



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

Titulación:

MASTER DE ENERGÍAS RENOVABLES: GENERACIÓN
ELÉCTRICA

Título del proyecto:

“CONVERTIDOR DC/DC REDUCTOR (BUCK) CON
CONTROL DE CORRIENTE Y DE TENSION”

Alumno: Roberto Colomo Ibáñez

Tutores: Luis Marroyo Palomo y Javier Marcos Álvarez

Pamplona, Septiembre de 2013

Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión

INDICE

| | |
|---|-----------|
| 0.INTRODUCCION..... | 2 |
| 1.DESCRIPCION DEL CONVERTIDOR DC/DC REDUCTOR..... | 3 |
| 1.1ESTRUCTURA BUCK..... | 3 |
| 1.1.1EL MOSFET..... | 4 |
| 1.1.2EL DIODO..... | 7 |
| 1.1.3INDUCTANCIA..... | 10 |
| 1.1.4CONDENSADOR..... | 10 |
| 1.1.5EL DRIVER..... | 10 |
| 1.2FUNCIONAMIENTO DEL BUCK..... | 12 |
| 1.2.1PWM: MODULACION POR ANCHURA DE PULSO..... | 12 |
| 1.2.2RIZADO DE CORRIENTE..... | 15 |
| 1.2.3RIZADO DE TENSION..... | 17 |
| 1.2.4EFECTO DE LAS INDUCTANCIAS PARASITAS: CONDENSADORES DE DESACOPLO..... | 18 |
| 1.3CONTROL..... | 21 |
| 1.3.1LAZO DE CONTROL..... | 21 |
| 1.3.2LAZOS EN CASCADA..... | 23 |
| 1.3.2.1LAZO INTERNO DE CORRIENTE..... | 24 |
| 1.3.2.2LAZO EXTERNO O LAZO DE TENSION..... | 27 |
| 2.DISEÑO DEL CONVERTIDOR..... | 31 |
| 2.1FORMAS DE ONDA..... | 31 |
| 2.2DIMENSIONADO DE LOS ELEMENTOS DE LA PLANTA DEL CONVERTIDOR..... | 39 |
| 2.2.1CALCULO DE LA INDUCTANCIA..... | 39 |
| 2.2.2CALCULO DEL CONDENSADOR..... | 40 |
| 2.2.3ELECCION DE LOS SEMICONDUCTORES DE POTENCIA..... | 44 |
| 2.3DISEÑO DEL CONTROL DEL CONVERTIDOR..... | 45 |
| 2.3.1CONTROL SIN RECHAZO DE PERTURBACIONES..... | 46 |
| 2.3.2CONTROL CON RECHAZO DE PERTURBACIONES..... | 57 |
| 2.3.3CONTROL CON RECHAZO DE PERTURBACIONES ANALOGICO..... | 66 |
| 3.FUNCIONAMIENTO DEL CONVERTIDOR..... | 78 |
| 3.1SIMULACIONES EN PSIM..... | 78 |
| 3.2COMPARACION ENTRE EL CONVERTIDOR CON RECHAZO DE PERTURBACIONES Y SIN RECHAZO DE PERTURBACIONES..... | 80 |
| 4.MATERIALES..... | 82 |
| 5.PROGRAMA PSIM..... | 83 |
| 6.BIBLIOGRAFIA..... | 83 |

Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión

0. INTRODUCCION

El Trabajo Fin de Master que se describe a continuación tiene como objetivo el diseño de un convertidor reductor (Buck) que servirá de base para una posterior construcción, que se utilizará en las prácticas de laboratorio del Departamento de Ingeniería Eléctrica del Edificio de los Pinos.

El convertidor Buck es un convertidor DC a DC que obtiene a su salida una tensión continua menor o igual a la de su entrada. Es un tipo de fuente de alimentación conmutada que contiene al menos dos interruptores semiconductores y al menos un elemento para almacenar energía.

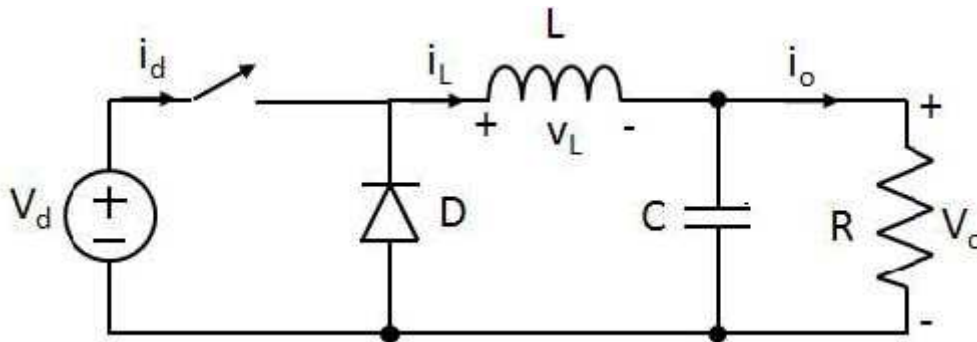


Figura 0.1 Convertidor DC/DC reductor

El objetivo de realizar este convertidor es poder controlar la tensión de salida que entregara a las cargas y eso se realizara mediante los llamados lazos de control.

Los lazos de control a realizar en este proyecto serán cerrados, es decir con realimentación y además se controlara también la corriente que pasara por la inductancia, por lo que se realizara un control en cascada.

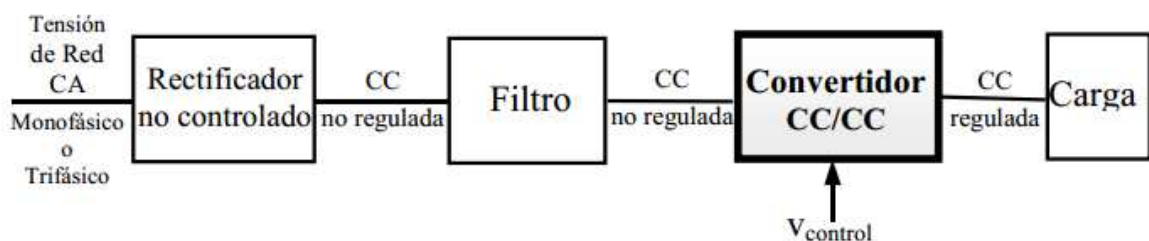
Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión

1. DESCRIPCION DEL CONVERTIDOR DC/DC REDUCTOR

1.1 ESTRUCTURA BUCK

Los convertidores CC/CC son ampliamente utilizados en fuentes de alimentación continuas conmutadas (generalmente con un transformador de aislamiento) y en aplicaciones de accionamiento de motores.

Como se muestra en la Figura 1, habitualmente la entrada de estos convertidores es una tensión continua no regulada, la cual se obtiene rectificando la tensión de línea y, por eso, esta fluctuará a los cambios en la magnitud de la tensión.



Podemos definir los convertidores CC/CC como circuitos que transforman una tensión continua (por lo general no regulada) en otra también continua y regulada.

Básicamente un convertidor de potencia está constituido por dispositivos semiconductores que hacen de interruptores de potencia. En función de dichos interruptores existen convertidores controlados y no controlados. En nuestro caso tenemos un semiconductor controlado y otro no controlado que explicaremos como obtenerlos más adelante.

Se dice que un convertidor es controlado cuando los interruptores que lo constituyen pueden ser controlados en su encendido (Tiristores), o es su encendido y apagado (Transistores BJT, MOSFET, IGBT).

El convertidor Buck está formado por dos interruptores de potencia: Un Mosfet con el que controlamos el encendido y apagado, y un diodo de conmutación espontánea. A pesar de tener un interruptor de conmutación espontánea el convertidor es controlado.

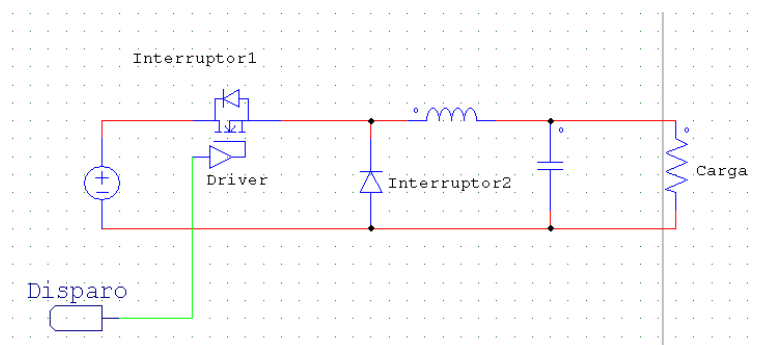


Figura 1.1 Configuración Buck con sus interruptores semiconductores

Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión

1.1.1 EL MOSFET

Es un transistor de efecto de campo que se controla por tensión en el encendido y en el apagado. Existen de tipo P y de tipo N, pero para aplicaciones de electrónica de potencia únicamente utilizaremos los de tipo N.

Como se puede observar en la figura 1.1, el semiconductor está formado por 3 terminales: el drenador (D), la puerta (G) y el sumidero (S). Sus prestaciones se establecen a partir de 3 características:

1. *Característica de controlabilidad.*- Presenta control de encendido y apagado
2. *Característica estática.*- Fija la reversibilidad en tensión y/o corriente del semiconductor, así como la tensión máxima que puede soportar en corte y la corriente máxima que puede soportar en conducción. En el caso de un Mosfet, para una corriente de drenador I_d y la tensión drenador sumidero V_{ds} positivas, según la figura 1.2, su característica estática se muestra en la figura 1.3

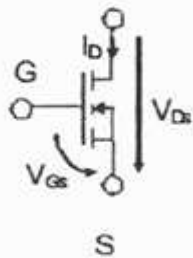


Fig 1.1 Corriente y tensión Positivas en un Mosfet

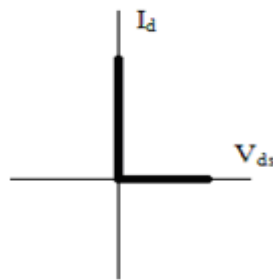


Fig.1.3 Característica estática de un Mosfet

3. *Característica dinámica.*- Determina la trayectoria seguida del paso del estado de conducción al de corte y viceversa. Es decir, el camino seguido en las conmutaciones, del encendido al apagado y viceversa. A continuación se explican las fases importantes del encendido y apagado de un Mosfet, según el circuito de la figura 1.4. Se destaca el hecho de que en las conmutaciones es necesario cargar y descargar las capacidades parásitas de Mosfet.

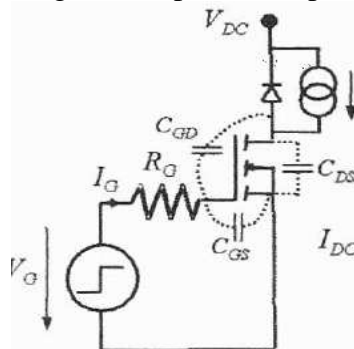


Fig 1.4 Circuito de conmutación del Mosfet

Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión

• ENCENDIDO

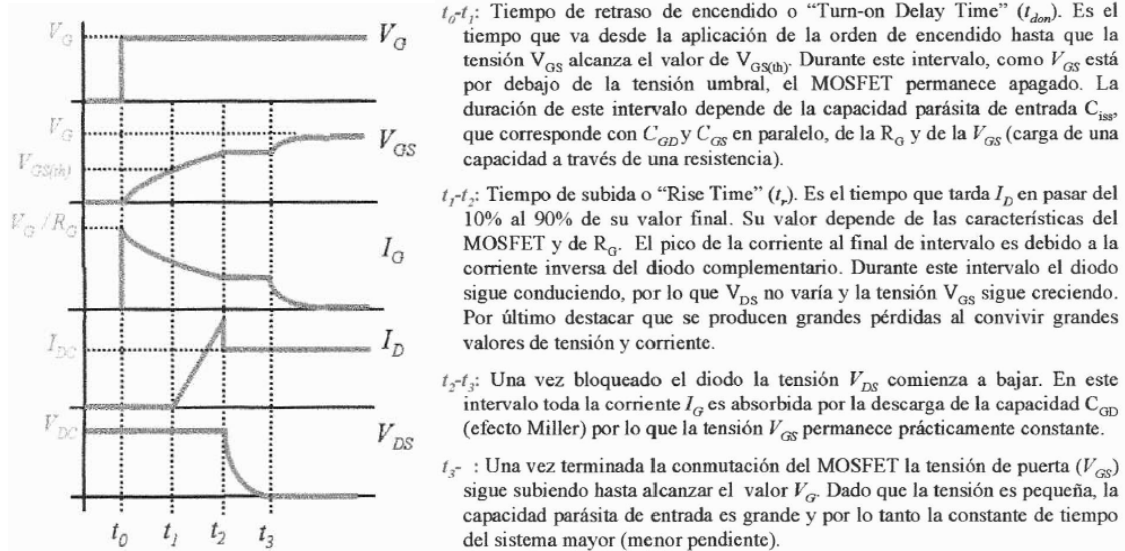


Fig 1.5 Característica de encendido de un Mosfet

• APAGADO

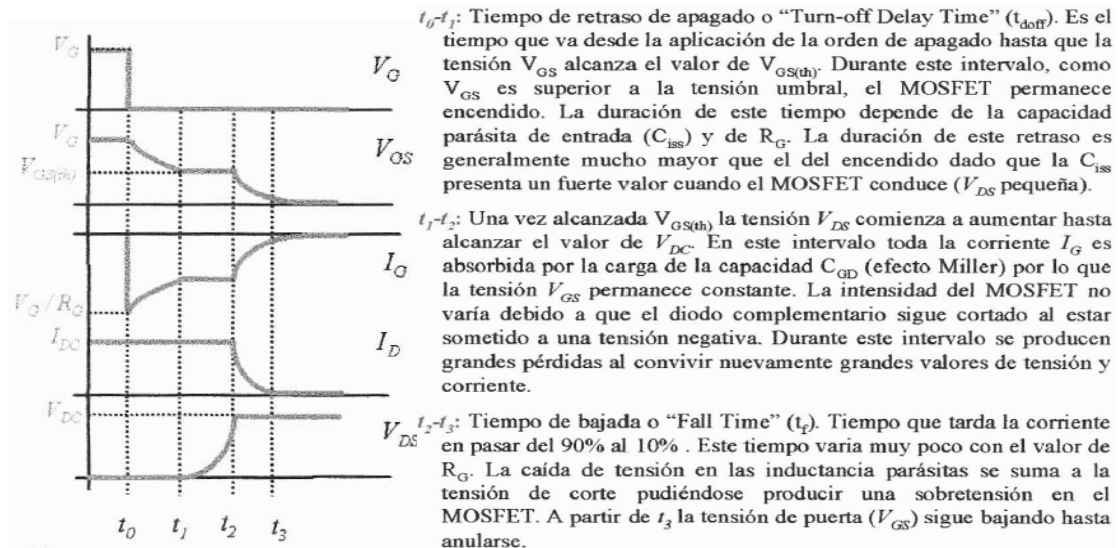


Fig 1.6 Característica de apagado del Mosfet

Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión

-PERDIDAS EN EL MOSFET

Son el resultado de:

$$P_{\text{MOSFET}} = P_{\text{estáticas}} + P_{\text{dinámicas (conmutación)}}$$

Perdidas estáticas:

$$P_{\text{estáticas}} = P_{\text{conducción}} + P_{\text{corte}}$$

Las pérdidas por conducción están formadas por instantáneas y valor medio por lo tanto obtenemos las siguientes ecuaciones:

Instantáneas

$$p_{\text{cond}} = V_{\text{dssat}} \cdot i_d$$

Valor medio

$$P_{\text{cond}} = \frac{1}{T} \int p_{\text{cond}}(t) \cdot dt$$

Las pérdidas de corte se pueden considerar prácticamente despreciables.

Perdidas dinámicas:

$$P_{\text{conm}} = P_{\text{encendido}} + P_{\text{apagado}} = (E_{\text{on}} + E_{\text{off}}) F_{\text{con}}$$

Donde:

- Eon es la energía disipada durante un encendido
 - Eoff es la energía disipada durante un apagado
 - Fcon es la frecuencia de conmutación
- Finalmente se puede decir que el valor de todas las pérdidas de un Mosfet aumentan con la frecuencia de conmutación. Será necesario incorporar un disipador de calor.

Mas adelante se explicara porque uno de los semiconductores escogidos es un Mosfet

Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión

1.1.2 EL DIODO

Es el interruptor semiconductor más sencillo que existe. Está formado por dos terminales, el ánodo (A), y el cátodo (K) como se observa en la figura 1.7.

Al igual que el Mosfet se define con sus 3 características:

1.- Característica de controlabilidad.

El diodo no es un dispositivo controlado y conduce o está en corte según las condiciones externas del sistema.

2.- Característica estática.

Según la figura 1.7 un diodo conduce si la corriente va de ánodo a cátodo y entra en corte si dicha corriente intenta ir en sentido contrario.

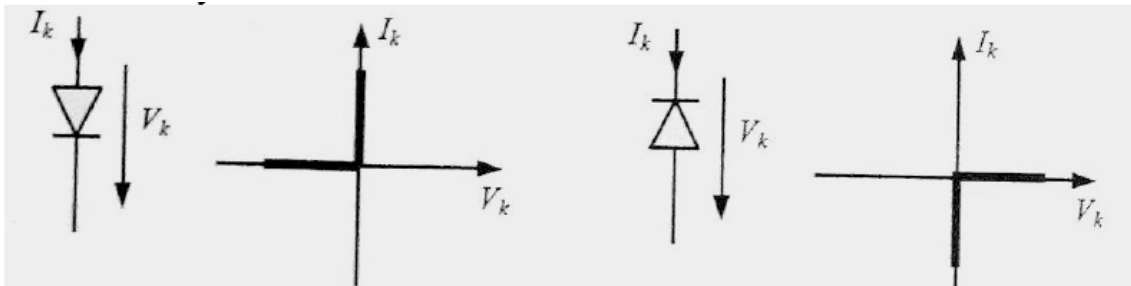


Fig 1.7 Característica estática del diodo

De acuerdo a la figura 1.7 el diodo no es reversible ni en tensión ni en corriente y cumple lo siguiente:

- En conducción $I_{AK} > 0$ y $V_{AK} \approx 0V$ ($0.8V \div 2V$). En este caso se dice que el diodo está polarizado en directa.
- En corte: $V_{AK} < 0$ y $I_{AK} = 0$. Se dice que el diodo está polarizado en inversa.

Durante la conducción el diodo se puede representar con el siguiente modelo.

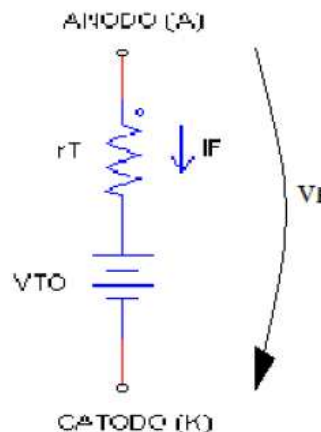


Fig 1.8 Circuito equivalente de un diodo

Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión

Una fuente de tensión V_{TO} que varía entre 0.8 y 2V, en serie con una resistencia de un valor de $m\Omega$.

3.-Característica dinámica.- Se representa en la figura 1.9

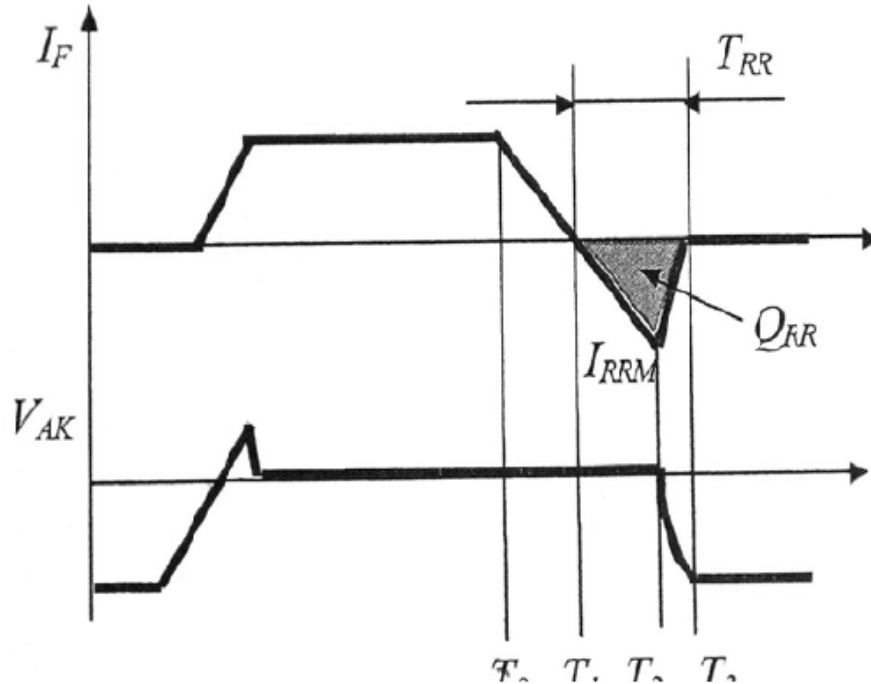


Fig 1.9 Característica dinámica de un diodo

- ENCENDIDO

Como se dijo, el diodo conduce si desde el sistema exterior se le aplica una tensión positiva. Sin embargo, dado que al principio no existen portadores de carga en el diodo se produce una tensión que alcanza los 30V. Una vez que existen suficientes portadores como para que el diodo conduzca, la tensión en sus bornes disminuye hasta el valor de la tensión directa V_F

- APAGADO

1.- En T_0 el circuito exterior hace que la corriente por el diodo empiece a bajar.

2.- una vez que la corriente I_F se anula en T_1 el diodo está lleno de portadores de carga por lo que empieza a circular una corriente negativa correspondiente con la extracción de dichas cargas. Su valor máximo corresponde con la corriente de recuperación inversa máxima, I_{RRM} en T_2 , y depende tanto de la corriente I_F del inicio como de dI_F/dt durante el apagado.

3.- Una vez termina la extracción de cargas el diodo se corta. La corriente varía bruscamente hasta anularse y la tensión se hace negativa hasta alcanzar un valor que depende del circuito exterior.

Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión

- El tiempo comprendido entre T_1 y T_3 corresponde al tiempo de recuperación inversa T_{RR} , el tiempo que tarda en apagarse el diodo y las cargas extraídas corresponden a la Q_{RR} , carga de recuperación inversa.

- **PERDIDAS**

Igual que en el Mosfet son el resultado de:

$$P_{MOSFET} = P_{estáticas} + P_{dinámicas}(\text{conmutación})$$

Perdidas estáticas:

$$P_{estáticas} = P_{conducción} + P_{corte}$$

Las pérdidas estáticas por conducción se pueden calcular de 2 formas:

- Usando la característica V-I del diodo polarizado en directa, en función de la corriente I_F obtenemos V_F .
- Sabiendo que en conducción se comporta según el circuito de la figura 1.8, se puede decir que:

$$P_{cond} = V_F(I_F) \cdot I_F \approx V_{TO} \cdot I_F + r_T \cdot I_F^2$$

Las pérdidas de corte se pueden considerar prácticamente despreciables.

Perdidas dinámicas:

$$P_{conm} = P_{encendido} + P_{apagado} = (E_{on} + E_{off}) F_{con}$$

Las pérdidas en el encendido se pueden considerar despreciables

Las pérdidas en el apagado se pueden calcular aproximadamente a partir de la carga de recuperación inversa (Q_{RR}) y la tensión de inversa, V_R a la que corta el diodo impuesta por el sistema externo.

$$P_{off} = E_{off}(I_F, dI_F/dt, V_R) \cdot F_{con} \approx Q_{RR} \cdot V_R \cdot F_{con}$$

Gual que sucedía con el Mosfet, las pérdidas en un diodo son considerables con el aumento de la frecuencia de conmutación. Y dado que su valor. Como se vera mas adelante es elevado, es necesario el uso de un disipador de calor que vite el calentamiento de el diodo y su posterior destrucción.

Más adelante se explicara porque el segundo semiconductor es un diodo.

Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión

1.1.3 INDUCTANCIA

La inductancia (L), es una medida de la oposición a un cambio de corriente de un inductor o bobina que almacena energía en presencia de un campo magnético, y se define como la relación entre el flujo magnético (Φ) y la intensidad de corriente eléctrica (I) que circula por la bobina y el número de vueltas (N) del devanado:

$$L = \frac{\Phi N}{I}$$

La inductancia depende de las características físicas del conductor y de la longitud del mismo. Si se enrolla un conductor, la inductancia aumenta. Con muchas espiras se tendrá más inductancia que con pocas. Si a esto añadimos un núcleo de ferrita, aumentaremos considerablemente la inductancia.

1.1.4 CONDENSADOR

Un condensador es un dispositivo pasivo capaz de almacenar energía sustentando un campo eléctrico. Está formado por un par de superficies conductoras, generalmente en forma de láminas o placas, en situación de influencia total (esto es, que todas las líneas de campo eléctrico que parten de una van a parar a la otra) separadas por un material dieléctrico o por el vacío. Las placas, sometidas a una diferencia de potencial, adquieren una determinada carga eléctrica, positiva en una de ellas y negativa en la otra, siendo nula la variación de carga total.

Aunque desde el punto de vista físico un condensador no almacena carga ni corriente eléctrica, sino simplemente energía mecánica latente; al ser introducido en un circuito se comporta en la práctica como un elemento "capaz" de almacenar la energía eléctrica que recibe durante el periodo de carga, la misma energía que cede después durante el periodo de descarga.

Carga y descarga

Al conectar un condensador en un circuito, la corriente empieza a circular por el mismo. A la vez, el condensador va acumulando carga entre sus placas. Cuando el condensador se encuentra totalmente cargado, deja de circular corriente por el circuito. Si se quita la fuente y se coloca el condensador y la resistencia en paralelo, la carga empieza a fluir de una de las placas del condensador a la otra a través de la resistencia, hasta que la carga es nula en las dos placas. En este caso, la corriente circulará en sentido contrario al que circulaba mientras el condensador se estaba cargando.

1.1.5 EL DRIVER

Es el encargado de adecuar las señales de encendido y apagado a las exigencias del Mosfet. Es decir, adecua los disparos enviados por el sistema de control a las exigencias del sistema de potencia en el que se sitúan los transistores. Generalmente incorpora las siguientes funciones:

- Amplificación de la señal de control a los valores de tensión y corriente necesarios.

Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión

- Aislamiento galvanizado entre el sistema de control y el de potencia. Esto lo hace mediante un transformador de pulsos, opto-acoplador o fibra óptica.
- Protecciones contra tensiones bajas de alimentación y cortocircuitos.

Su esquema funcional se puede observar en la figura 1.10

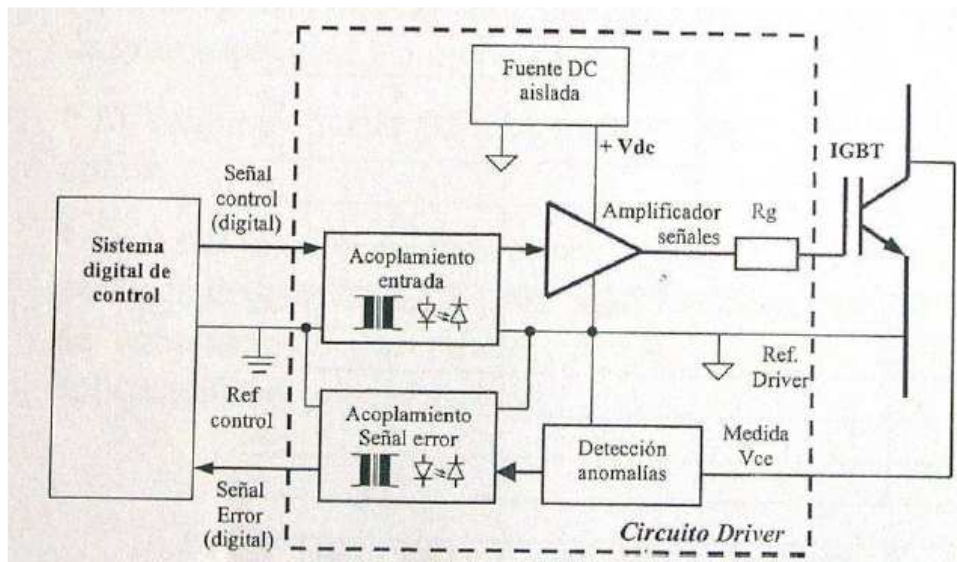


Fig 1.10 Esquema funcional de un driver

Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión

1.2 FUNCIONAMIENTO DEL BUCK

1.2.1 PWM: MODULACION POR ANCHURA DE PULSO

La técnica de modulación PWM permite encender y apagar los semiconductores de potencia (Mosfets), para obtener una tensión troceada a la salida a partir de la cual interesa percibir únicamente el valor medio de dicha tensión.

En el Buck al utilizar la técnica PWM lo que haremos será dar las ordenes de encendido y apagado para el Mosfet.

Esta técnica consiste en comparar una señal triangular con una tensión de control que dará una onda cuadrada indicando al Mosfet cuando debe encenderse y cuando apagarse como veremos en la figura 1.11. La parte principal del PWM es el comparador que compara 2 tipos de señales analógicas:

- Una señal de continua que se encarga de conseguir el valor medio de tensión a la salida esta tensión recibe el nombre de modulante (V_{con})
- Una señal triangular que define la frecuencia de conmutación del Mosfet

De la comparación se consigue a la salida una señal de tipo Digital (F). Su valor es alto si la modulante es mayor que la triangular. Y su valor es bajo en caso contrario. Con esta señal se determinan los disparos accionados por el driver y enviado al Mosfet. La modulante podrá obtener valores comprendidos entre 0 y V_{pt} .

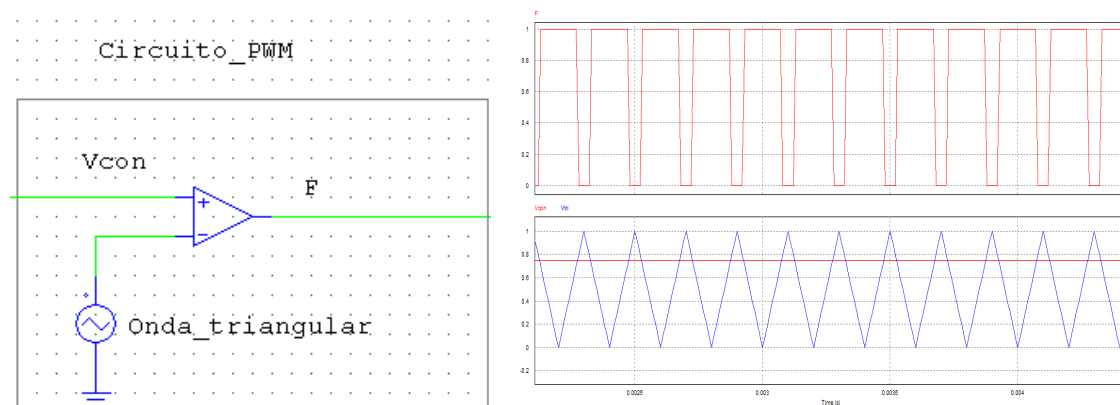


Fig 1.11 Circuito PWM de implantación analógica

Tal y como vemos en la fig 1.11 la señal F que indica el encendido y apagado del Mosfet, cuando esta a nivel alto (1 en este caso) el Mosfet se enciende y cuando esta a nivel bajo (0 en este caso) el Mosfet se apaga, dando lugar a 2 circuitos que serán los responsables de las ondas de salida del convertidor.

Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión

- Mosfet encendido (Conduce el Mosfet Y el diodo está en corte)

A este periodo de tiempo lo denominaremos T_{on}

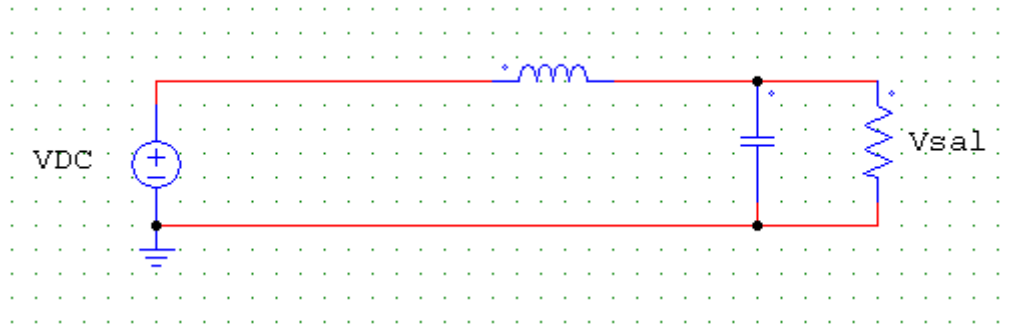


Fig 1.12 Circuito Ton

- Mosfet apagado (Conduce el diodo y Mosfet en corte)

A este periodo de tiempo lo denominaremos T_{off}

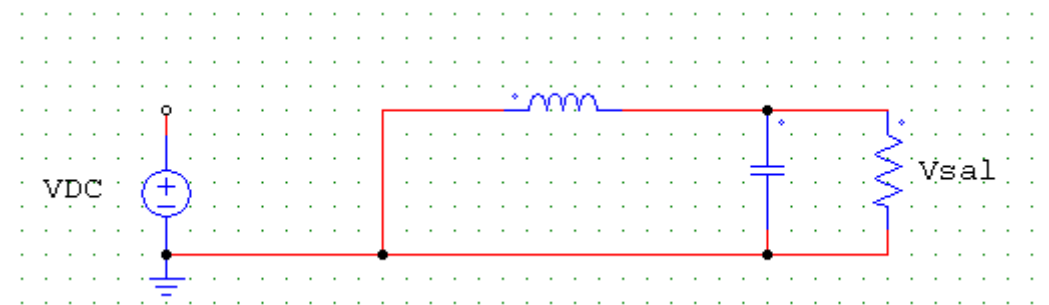


Fig 1.13 Circuito Toff

A partir de estos dos circuitos y teniendo en cuenta la inductancia podremos obtener las siguientes relaciones como se observa en la fig 1.14:

$$V_L \text{ en } T_{on} \rightarrow V_L = V_{DC} - V_{SAL}$$

$$V_L \text{ en } T_{off} \rightarrow V_L = -V_{SAL}$$

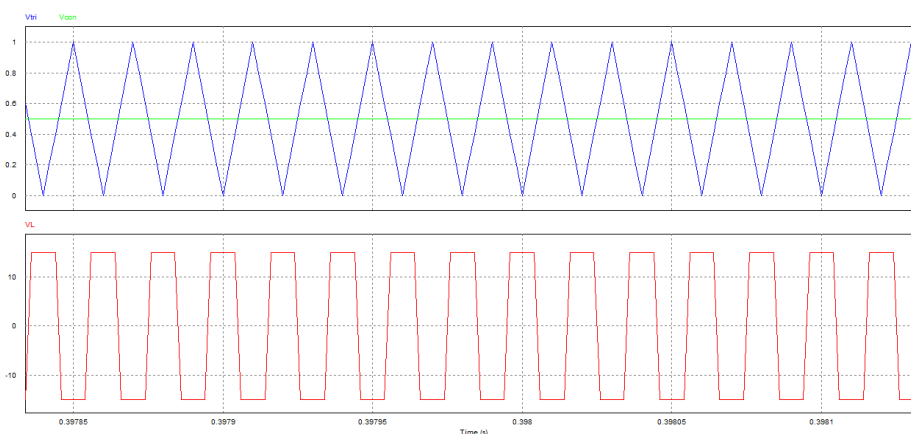


Fig 1.14 tensión en la inductancia

Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión

$$\begin{aligned} \langle V_L \rangle &= \frac{1}{T_{con}} \int V_L \cdot dt = \frac{1}{T} \left(\int_0^{T_{on}} V_L \cdot dt + \int_{T_{on}}^{T_{off}} V_L \cdot dt \right) = \frac{1}{T_{con}} \left(\int_0^{T_{on}} (V_{DC} - V_{sal}) \cdot dt + \int_{T_{on}}^{T_{off}} -V_{sal} \cdot dt \right) = \\ &= \frac{1}{T_{con}} \left((V_{DC} - V_{sal}) \cdot T_{on} + [-V_{sal} \cdot T_{off} + V_{sal} \cdot T_{on}] \right) \\ \langle V_L \rangle &= \frac{(V_{DC} - V_{sal}) \cdot T_{on} + (-V_{sal}) \cdot T_{off}}{T_{con}} \end{aligned}$$

Sabemos que el valor medio de la tensión en una inductancia es 0 por lo tanto:

$$\begin{aligned} 0 &= V_{Dc} \cdot T_{on} - V_{sal} \cdot T_{on} - V_{sal} \cdot T_{off} \\ 0 &= V_{Dc} \cdot T_{on} - V_{sal} \cdot (T_{on} + T_{off}) \\ 0 &= V_{Dc} \cdot T_{on} - V_{sal} \cdot T_{Con} \\ V_{sal} &= V_{Dc} \cdot \frac{T_{on}}{T_{Con}} = V_{Dc} \cdot D \end{aligned}$$

La fracción formada por T_{on}/T_{con} es denominada como ciclo de trabajo D y sus valores oscilarán entre 0 y 1 pudiendo entregar así el convertidor tensiones desde el valor de V_{DC} hasta 0V.

De la fig 1.12 podemos obtener otra relación también para el ciclo de trabajo, por el teorema de semejanza de triángulos.

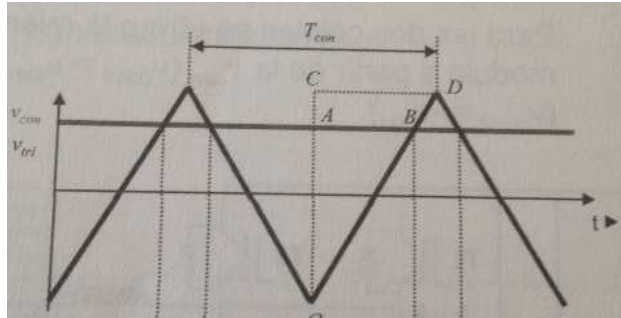


Fig 1.12 Onda triangular vs Vcon

El triángulo OAB es semejante al triángulo OCD y por lo tanto según el teorema de Tales:

$$\frac{AB}{CD} = \frac{OA}{OC} \Leftrightarrow \frac{\frac{T_{on}}{2}}{\frac{T_{con}}{2}} = \frac{V_{con}}{V_{pt}}$$

$$\frac{T_{on}}{T_{Con}} = \frac{V_{con}}{V_{pt}} = D$$

Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión

En resumen, utilizando la técnica PWM lo que conseguiremos será obtener una tensión de salida de igual valor o inferior a la de entrada. Dicha tensión por el mero hecho de ser conmutada tendrá rizado, al igual que la corriente que explicaremos a continuación.

1.2.2 RIZADO DE CORRIENTE

Al utilizar la técnica PWM como hemos visto en el punto anterior obtenemos una tensión en la inductancia con dos valores distintos, uno en t_{on} y otro en t_{off} lo que provocará una suave variación de la corriente durante estos intervalos al que llamaremos rizado.

Se puede demostrar fácilmente mediante la ecuación de la inductancia.

$$V_L = L \cdot \frac{dI_L}{dt}$$

Donde:

V_L es la tensión de la inductancia

L el coeficiente de inducción en

dI_L la variación de la corriente

dt la variación de tiempo

- Durante t_{on} $V_L = V_{DC} - V_{SAL}$ (V_L es positivo ya que V_{SAL} nunca es mayor a V_{DC})

Si V_L es positivo y L es una constante $\frac{dI_L}{dt} \approx \uparrow$ (La I_L aumenta con el tiempo)

- Durante $t_{off} = -V_{SAL}$ (V_L es negativo)

Si V_L es negativo y L es una constante $\frac{dI_L}{dt} \approx \downarrow$ (la I_L disminuye con el tiempo)

Veamos en la figura 1.13 lo explicado

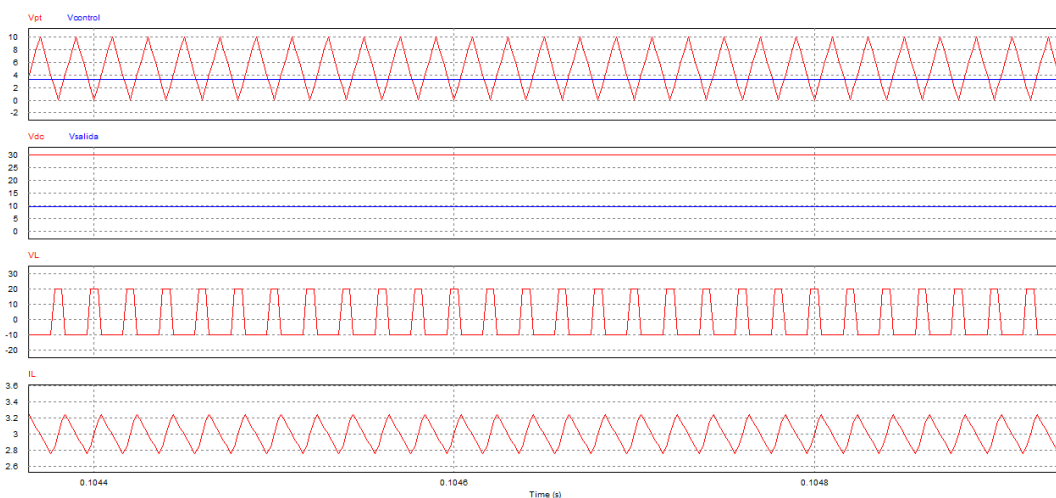


Fig 1.13 Rizado de corriente

Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión

En la figura 1.13 se ve perfectamente todo lo explicado anteriormente. Mediante la técnica PWM observamos que en ton VL es positiva y en toff es negativa, viendo así la variación correspondiente a cada caso denominado rizado de corriente.

Vamos a analizar el rizado de corriente durante el periodo t_{on} (podríamos analizarlo también durante t_{off})

Hemos dicho que la tensión en la inductancia corresponde a la siguiente formula:

$$V_L = L \cdot \frac{dI_L}{dt}$$

Pues bien vamos a aplicarla durante el periodo t_{on}

$$V_{DC} - V_{SAL} = L \cdot \frac{dI_L}{dt}$$

Donde:

$$V_{SAL} = V_{DC} \cdot D$$

$$dI_L = \Delta I_L$$

$$dt = t_{on}$$

Aplicando los cambios:

$$V_{DC}(1-D) = L \cdot \frac{\Delta I_L}{t_{on}} \quad \frac{V_{DC}(1-D) \cdot t_{on}}{L} = \Delta I_L$$

Donde:

$$t_{on} = D \cdot t_{con}$$

$$t_{con} = \frac{1}{f_{con}}$$

Aplicando los cambios:

$$\frac{V_{DC}(1-D) \cdot D}{L \cdot f_{con}} = \Delta I_L$$

Pues bien a partir de esta formula podemos conocer el rizado máximo que vamos a obtener en nuestro convertidor. El valor máximo de rizado en la inductancia se produce

cuando la $\frac{d\Delta I_L}{dD} = 0$

$$\frac{d\Delta I_L}{dD} = \frac{V_{DC} [(-D) + (1-D)]}{L \cdot f_{con}} = \frac{V_{DC} \cdot (1-2D)}{L \cdot f_{con}} = 0$$

$$V_{DC} \cdot (1-2D) = 0 \quad D_{\max} = \frac{1}{2}$$

Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión

El valor máximo del rizado de corriente en nuestro convertidor se dará para un ciclo de trabajo de 0,5.

$$\Delta I_{L\max} = \frac{V_{DC}}{4 \cdot L \cdot f_{con}}$$

A partir de lo visto anteriormente podemos disminuir el valor del rizado de corriente modificando el valor de la inductancia “L” y de la frecuencia de conmutación “f_{con}”

Interesa disminuir el rizado de corriente ya que tiene varios efectos perjudiciales:

- Pérdidas en el núcleo magnético
- EMI
- Puede sacar al convertidor del régimen continuo
- Incrementa la capacidad requerida a la salida del convertidor

1.2.3 RIZADO DE TENSION EN EL CONDENSADOR

Una vez explicado el rizado de corriente en la inductancia conviene explicar el rizado de tensión existente en la capacidad de salida.

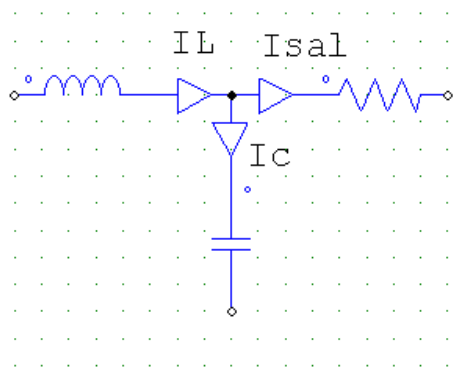


Fig 1.14 Corrientes en el Buck

Aplicando teoría de circuitos observamos en la figura 1.14 que tanto en ton como en toff $I_L = I_{sal} + I_C$. Sabemos que el valor medio de la corriente en un condensador es 0 pero también sabemos que esta tiene rizado ya que I_{sal} es una corriente continua prácticamente perfecta.

- El valor máximo de rizado en la capacidad se dará cuando el valor de rizado en la inductancia sea el máximo, ya que la corriente en el condensador es precisamente el rizado de corriente en la inductancia.

$$\Delta Q = C \cdot \Delta V_C \quad \Delta V_C = \frac{1}{C} \cdot \Delta Q = \frac{1}{C} \cdot \frac{t_{con}}{2} \cdot \frac{\Delta I_L}{2} = \frac{t_{con} \cdot \Delta I_L}{8 \cdot C} = \frac{\Delta I_L}{8 \cdot C \cdot f_{con}}$$

Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión

$$\Delta V_C = \frac{\Delta I_L}{8 \cdot C \cdot f_{con}} \quad \Delta V_{C \max} = \frac{\Delta I_{L \max}}{8 \cdot C \cdot f_{con}} = \frac{\frac{V_{DC}}{4 \cdot L \cdot f_{con}}}{8 \cdot C \cdot f_{con}} = \frac{V_{DC}}{32 \cdot C \cdot L \cdot f_{con}^2}$$
$$\Delta V_{C \max} = \frac{V_{DC}}{32 \cdot C \cdot L \cdot f_{con}^2}$$

Veamos a continuación en la fig 1.15 el rizado tanto de corriente en la inductancia como de tensión en el condensador.

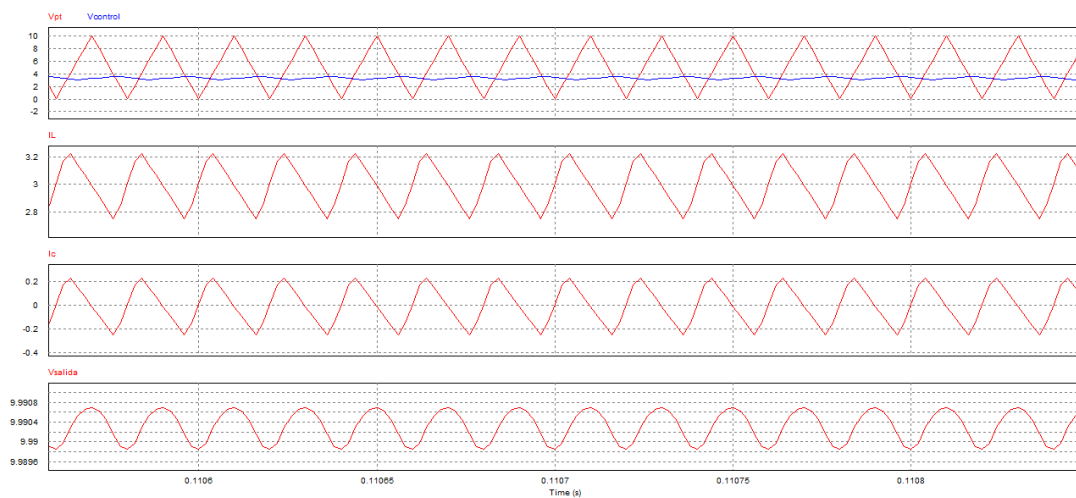


Fig 1.15 Rizado de corriente y de tensión

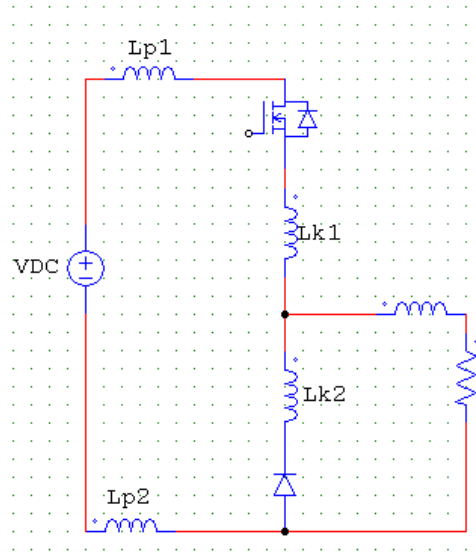
1.2.4 EFECTO DE LAS INDUCTANCIAS PARASITAS: CONDENSADORES DE DESACOPLO

El montaje del Buck se llevara a cabo utilizando cables, conectores, pistas de cobre (al realizar una placa de circuito impreso, PCB). Además las células de conmutación tienen tornillos que permiten su conexión a otros dispositivos.

Todas las conexiones presentes en el sistema van a introducir inductancias parasitas. Durante las conmutaciones del Mosfet del convertidor, se somete a dichas inductancias a fuertes derivadas de corriente lo que da lugar a sobretensiones en los semiconductores.

En la figura 1.16 se puede observar el convertidor conmutado básico, donde se ha tenido en cuenta las inductancias parasitas que existen en cada tramo:

Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión



1.16 Convertidor conmutado básico
con sus inductancias parasitas

En este convertidor la corriente solo puede ser positiva cuando el Mosfet este conduciendo, la corriente se cierra por L_{p1} , L_{k1} , la carga y L_{p2} . Posteriormente se supone que entra a conducir el diodo y en esta situación el Mosfet vera la siguiente tensión instantánea:

$$V_{k1} = E - (L_{p1} + L_{k1} + L_{k2} + L_{p2}) \cdot \frac{di_{k1}}{dt}$$

El valor de $\frac{di_{k1}}{dt}$ queda impuesto por el Mosfet. Actualmente existen interruptores capaces de conmutar corrientes superiores a 300A en menos de 100ns, con lo que se obtiene una gran derivada de corriente con respecto del tiempo: $\frac{di_{k1}}{dt} \geq \frac{3000A}{\mu seg}$. Se

supone el uso de conductores para conectar el convertidor con la alimentación y se sabe que aproximadamente por cada metro de conductor se tiene una inductancia de 1μH. Si además se tuviese una malla de longitud total de 20cm, la sobretensión que se obtiene en la inductancia total L_T , es:

$$L_T \cdot \frac{di_{k1}}{dt} = (1 \frac{\mu H}{m} \cdot 0,2m) \cdot 3000 \frac{A}{\mu seg} = 600V$$

Si suponemos una tensión de alimentación de 200V, el Mosfet vera la siguiente sobretensión: $V_{k1} = 200 - 600 = -400V$, un valor igual al doble de lo que debería soportar, ya que idealmente solo debería soportar la tensión de alimentación.

Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión

Recogiendo lo anterior, se destaca:

- El aumento de las inductancias parasitas aumenta la sobretensión producida en los semiconductores apagados.
- Para reducir el efecto de las inductancias parasitas se deben colocar todos los elementos lo más cerca posible entre ellos.
- Para reducir el efecto de las inductancias parasitas debidas a la conexión del convertidor con la fuente de alimentación se colocan los denominados condensadores de desacoplo, que deben colocarse lo mas cerca posible de la célula de conmutación y absorber la energía almacenada en las inductancias L_{p1} y L_{p2} . Esta conexión se observa en la figura 1.17

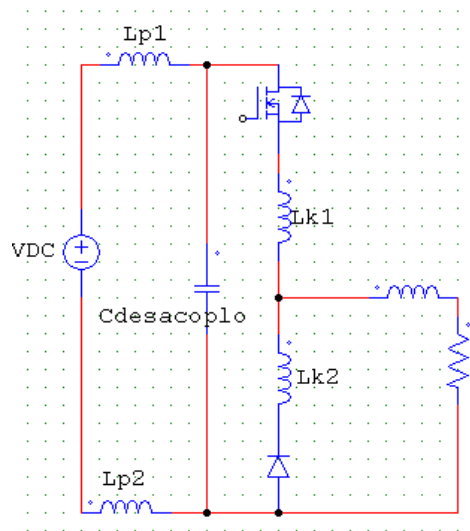


Fig 1.17 Conexión del condensador de desacoplo en la célula de conmutación

Volviendo al ejemplo anterior, si la longitud total para conectar la alimentación con el convertidor es de 20cm, el condensador deberá absorber la energía de la inductancia que produce la sobretensión de 600V.

$$E_{CDES} = \frac{1}{2} \cdot C_{DES} \cdot V_{CDES}^2 \Leftrightarrow E_L = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I_{k1}^2$$

Con una tensión de alimentación de 200V la tensión en el condensador de desacoplo C_{DES} será de 400V. Se imagina un caso en el que $K1$ deba conducir 300A, obviamente este es un valor de corriente demasiado grande; pero con este valor se puede establecer un valor de capacidad suficiente para utilizarlo en convertidores cuya potencia sea del orden de decenas de Kw. Con todo esto el valor de las capacidades desacoplo será:

$$E_L = E_{CDES} = \frac{1}{2} \cdot \left(1 \frac{\mu H}{m} \cdot 0.2m\right) \cdot 300^2 = 9mJ \Rightarrow C_{DES} = 2 \cdot \frac{E_{CDES}}{V_{CDES}^2} = 2 \cdot \frac{9mJ}{400^2} = 112,5nF$$

Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión

De la expresión anterior, se puede deducir que el valor del condensador de desacoplo deberá ser mayor cuanto menor sea la tensión que este debe soportar.

Es decir que teniendo la misma tensión de alimentación su valor aumenta si disminuye la sobretensión en las inductancias parasitas y se sitúa próximo a la tensión de alimentación. Esta situación es poco probable, dado que el convertidor se conecta a la alimentación a distancias mayores que 10cm, lo que aumenta el valor de la inductancia parasita. Por el contrario, teniendo la misma sobretensión su valor aumenta cuanto mas cerca de dicha sobretensión se sitúe la tensión de alimentación.

Por ejemplo, teniendo la misma sobretensión que antes 600V, y aumentando la tensión de alimentación a 500V, el valor de la capacidad de desacoplo será:

$$V_{CDES} = 600 - 500 = 100V \Rightarrow C_{DES} = 2 \cdot \frac{E_{CDES}}{V_{CDES}^2} = 2 \cdot \frac{9mJ}{100^2} = 1,8\mu F$$

Normalmente los valores del condensador de desacoplo están comprendidos entre 1μF y 5 μF. Aunque como se ha demostrado anteriormente es suficiente con uno de aproximadamente 2 μF para convertidores de decenas de KW.

1.3 CONTROL

El control constituye la parte más importante del convertidor. De su exactitud depende que el convertidor tenga un funcionamiento correcto.

Desempeña dos funciones importantes:

- Realizar un lazo cerrado de control para actuar sobre los valores de tensión y corriente del convertidor que permitan alcanzar las referencias establecidas.
- Realizar la lógica del encendido y apagado del convertidor cumpliendo unos requisitos establecidos.

1.3.1 LAZO CERRADO DE CONTROL

El lazo de control del convertidor será un lazo cerrado con realimentación negativa. El objetivo es variar la tensión de salida del convertidor según una tensión de referencia.

Esta configuración se caracteriza por:

- La presencia de sensores de medida que permiten tener información en todo momento de los valores de tensión y de corriente para los lazos respectivos de tensión y corriente. Precisamente son estos, los que brindan la realimentación del lazo.
- Para el lazo de tensión el sensor que se va a utilizar es un divisor de tensión, mientras que para el lazo de corriente el sensor a utilizar será una célula LEM, por lo general las medidas obtenidas a la salida de dichos sensores son valores de tensión reflejos de las medidas reales K_{sv} y K_{si}
- Debido a las elevadas frecuencias de conmutación del convertidor, a las salidas de los sensores de medidas es conveniente el uso de un filtro tipo PASO-BAJO

Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión

para eliminar el ruido debido a la frecuencia de conmutación. Su función de transferencia en el dominio de Laplace es:

$$F(s) = \frac{1}{\frac{s}{\omega_{fil}} + 1} \text{ Donde } \omega_{fil} = \text{frecuencia de corte del filtro paso bajo}$$

Con todo lo expuesto, se obtienen los diagramas de bloques del sensor de tensión y de corriente:

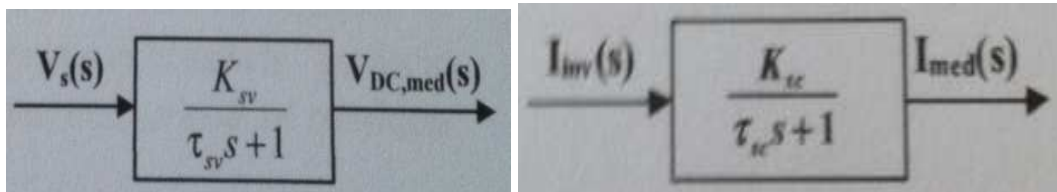


Fig 1.18 Bloque sensor de tensión y de corriente

- La presencia de un regulador de control que elimina en todo momento el error entre las referencias a seguir y las medidas obtenidas con los sensores. Existen reguladores de control de muchos tipos, sin embargo, el regulador más utilizado es el regulador PID (Proporcional-Integral-Derivativo). Su expresión es la siguiente:

$$u(t) = Kp \cdot \varepsilon(t) + Ki \cdot \int \varepsilon(t) \cdot dt + Kd \cdot \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \text{ Siendo } \varepsilon(t) \text{ el error en la entrada del}$$

regulador y u(t) la variable a de control a su salida

Consta de tres constantes que realizan tres acciones

- ACCION PROPORCIONAL.- La constante Kp elimina el error instantáneo. El aumento de su valor aumenta la rapidez del sistema alcanzando la referencia en un tiempo mas corto cuanto mayor sea Kp. Pero un valor demasiado elevado conlleva a que el sistema se haga oscilante o incluso inestable.
- ACCION INTEGRAL.- Con el fin de aportar mayor estabilidad al sistema, la constante Ki permite eliminar el error en régimen permanente. Dado que su valor es proporcional a la integral del error, esta constante dejara de integrar, es decir su valor se estabilizara, cuando el error sea nulo.
- ACCION DERIVATIVA.- Suaviza la respuesta del sistema durante los transitorios y mejora su comportamiento frente a perturbaciones. La constante Kd, al ser proporcional a la derivada del error, evita cualquier cambio brusco en su valor. Presenta el defecto de ser muy sensible a los ruidos de alta frecuencia, ya que en estas situaciones el valor de la derivada es muy alto e indeseable.

El regulador del lazo de este convertidor solo realizara las dos primeras acciones ya que en los convertidores de potencia, las altas frecuencias de conmutación provocan la existencia de un ruido al que es sensible la acción derivativa.

Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión

Por lo tanto el regulador a utilizar será un REGULADOR PI (Proporcional-Integral)

La expresión de la variable de control será:

$$u(t) = K_p \cdot \varepsilon(t) + K_i \cdot \int \varepsilon(t) \cdot dt = K_p \left(\varepsilon(t) + \frac{1}{T_n} \cdot \int \varepsilon(t) \cdot dt \right) \Rightarrow \text{donde : } K_i = \frac{K_p}{T_n}$$

Pasándola al dominio de Laplace se obtiene:

$$U(s) = K_p \left(\varepsilon(s) + \frac{1}{T_n \cdot s} \cdot \varepsilon(s) \right) = K_p \cdot \frac{T_n \cdot s + 1}{T_n \cdot s} \cdot \varepsilon(s), \text{ de donde se obtiene el diagrama de bloques de la Figura 1.19}$$

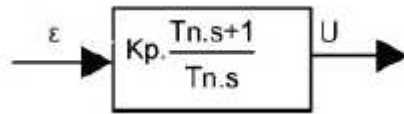


Fig 1.19 Bloque de un regulador PI

Un regulador PI tiene dos parámetros que se calculan estableciendo dos condiciones importantes en el sistema: rapidez y estabilidad.

- Finalmente se tiene el convertidor de potencia que efectúa las órdenes del lazo de control para conseguir la variación de tensión final.

1.3.2 LAZOS EN CASCADA

Se llaman lazos en cascada a la técnica que realiza el control de dos o más parámetros de un convertidor estando uno interno en el otro. Es decir nuestro convertidor va a realizar el control tanto de corriente como de tensión, pues bien una estructura en cascada realiza primero el lazo de corriente que esta internamente dentro del lazo de tensión y una vez a realizado este pasara a realizar el control del lazo de tensión.

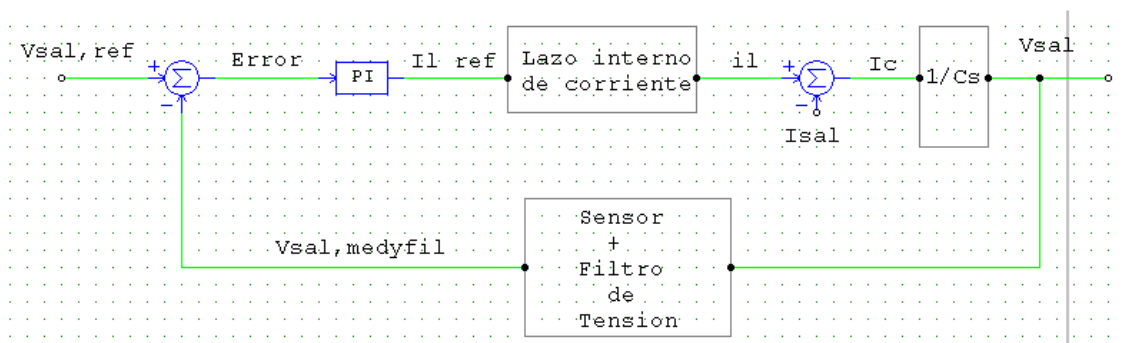


Fig 1.20 Diagrama de bloques de lazos en cascada

Una regla básica de los lazos en cascada exige que el lazo interno sea más rápido que el externo, en concreto el lazo de corriente debe ser 3 o 5 veces más rápido que el de tensión. Esta es una condición necesaria dado que el lazo interno recibe las órdenes del externo y debe ejecutarlas rápidamente para enviar una información adecuada al lazo

Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión

externo. Con esta exigencia se consigue el desacoplamiento de ambos lazos y al mismo tiempo se calculan los parámetros de los reguladores.

Un lazo de control se puede diseñar de varias formas: analógicamente con circuitos electrónicos, digitalmente programando un micro o a través del ordenador como es el caso del lazo de tensión ya existente. Optaremos por realizar un diseño analógico

1.3.2.1 LAZO INTERNO DE CORRIENTE

El lazo interno o lazo de corriente se encargara de realizar el control de la corriente en la inductancia, este deberá ser mas rápido que el lazo externo o de tensión para que el sistema funcione correctamente.

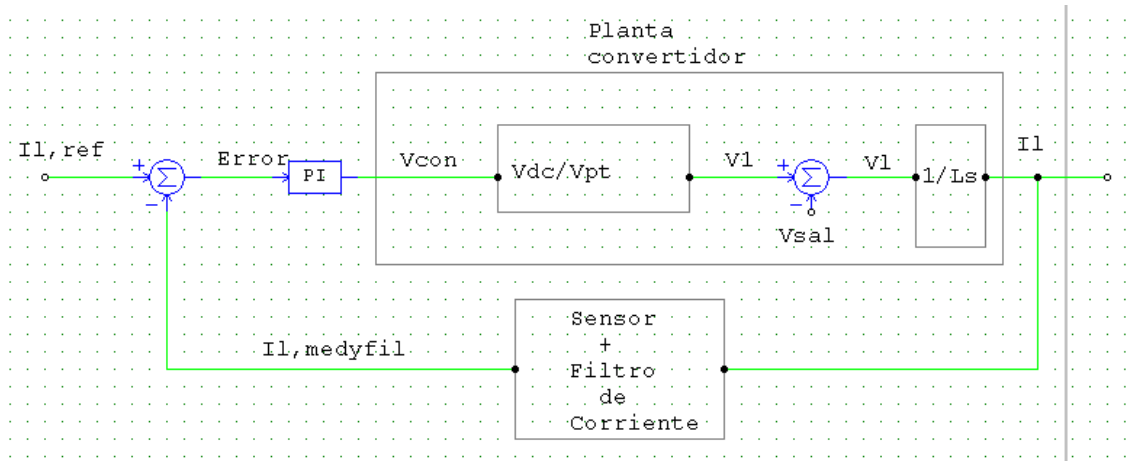


Fig 1.21 Diagrama de bloques Lazo Corriente

Como se puede observar en la figura 1.21 tenemos varios bloques:

- Planta convertidor
- Bloque de sensor y filtro
- Bloque Controlador o PI

Planta convertidor

Este bloque muestra el comportamiento del convertidor. Partimos del siguiente convertidor:

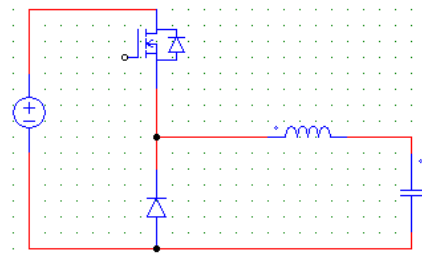


Fig 1.22 Planta Convertidor Reductor

Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión

Ecuaciones:

$$V_{con}(s) \cdot V_{dc} = L_s \cdot I_L(s)$$

$$I_L(s) = \frac{1}{L_s} [V_{con}(s) \cdot V_{dc} - V_{sal}(s)]$$

Ecuaciones promediando en un periodo de conmutación

$$V_1 = V_{diodo} = V_{con} \cdot V_{dc} = D \cdot V_{dc} \approx \frac{V_{con}}{V_{pt}} \cdot V_{dc}$$

$$L \frac{di_L}{dt} = V_L = V_1 - V_{sal} = \frac{V_{con}}{V_{pt}} \cdot V_{dc} - V_{sal}$$

Ecuaciones en “s”

$$\frac{V_{dc}}{V_{pt}} \cdot V_{con}(s) - V_{sal}(s) = L \cdot s \cdot i_L(s)$$

$$i_L(s) = \frac{1}{Ls} \left[\frac{V_{dc}}{V_{pt}} \cdot V_{con}(s) - V_{sal}(s) \right]$$

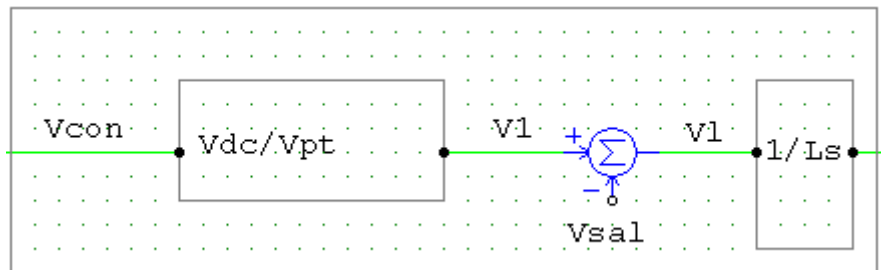


Fig 1.23 Bloque planta convertidor

Bloque sensor + filtro

Este bloque se encarga de medir la señal y adecuarla a unos valores a la que sea posible conectar los equipos de medida sin dañarlos. Además de medir la señal la pasamos por un filtro paso bajo para evitar así componentes indeseadas que perturben la medida de la señal a medir.

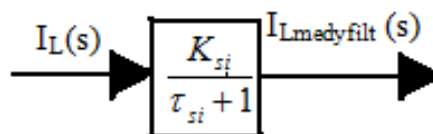


Fig 1.24 Bloque sensor + Filtro

Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión

En nuestro caso utilizaremos una célula Lem como sensor y un filtro paso-bajo RC que explicaremos con más detalle en el apartado de diseño.

Una característica importante del sensor, es que mide la corriente en amperios y transforma este parámetro a voltios, ya que los sistemas analógicos funcionan con valores de tensión. Esto se explicara mas adelante en el apartado de diseño correspondiente ya que se mostrara el esquema interno.

- K_{si} es la ganancia del sensor (un escalamiento entre amperios y Voltios explicado anteriormente)
- $\tau_i = \frac{1}{\omega_{cfi}}$ donde ω_{cfi} es la ω de corte del filtro de corriente
- s es la variable en el dominio de Laplace (en el dominio de frecuencia equivale a $2\pi f\omega_{Li}$ donde ω_{Li} es la ω del lazo de corriente

En el apartado de diseño se especificaran todas las ω

Bloque Controlador PI

El controlador PI es el encargado de la velocidad del lazo y de dar estabilidad al sistema. La presencia de un regulador de control elimina en todo momento el error entre las referencias a seguir y las medidas obtenidas con los sensores.

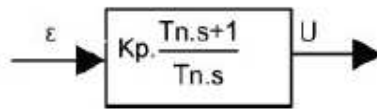


Fig 1.25 Bloque PI

Un regulador PI tiene dos parámetros que se calculan estableciendo dos condiciones importantes en el sistema: rapidez y estabilidad. Esto se explicara una vez obtenida la función de transferencia en lazo abierto.

La función de transferencia en lazo abierto resultante del conjunto de bloques que componen el lazo de corriente es:

$$FT_{LA} = \frac{K_P \cdot K_{SI} \cdot V_{DC}}{V_{PT} \cdot L \cdot Tn} \cdot \frac{1}{s^2} \cdot (Tns + 1) \cdot \frac{1}{\tau_{SI} + 1}$$

Una vez obtenida la función de transferencia el objetivo será buscar los parámetros del PI (K_P y Tn). La constante K_P es la que va a aportar la rapidez del lazo y la Tn es la que va a aportar estabilidad.

Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión

Como calcular el lazo:

- Criterio de estabilidad

$$-180 + MF = \arctg(Tns) - 180 - \arctg\left(\frac{s}{\omega_{cfi}}\right)$$

De esta ecuación sacamos el parámetro Tn

El MF estará en torno a 40° y 60°

- Criterio de rapidez

$$FT_{LA} = \frac{K_P \cdot K_{SI} \cdot V_{DC}}{V_{PT} \cdot L \cdot Tn} \cdot \frac{1}{\omega_{Li}^2} \cdot \sqrt{\frac{(Tns)^2 + 1}{(\omega_{Li})^2 + 1}}$$

En esta ecuación $FT_{LA}=1$ y despejamos Kp

1.3.2.2 LAZO EXTERNO O LAZO DE TENSION

El lazo externo o de tensión se encarga de controlar la tensión a la salida del convertidor o la tensión en bornes del condensador, a partir de un valor de referencia dado de tensión que nosotros deseemos el controlador hará que el convertidor obtenga esa tensión de salida en bornes del condensador, este lazo debe ser mas lento del lazo de corriente para que el sistema funcione correctamente.

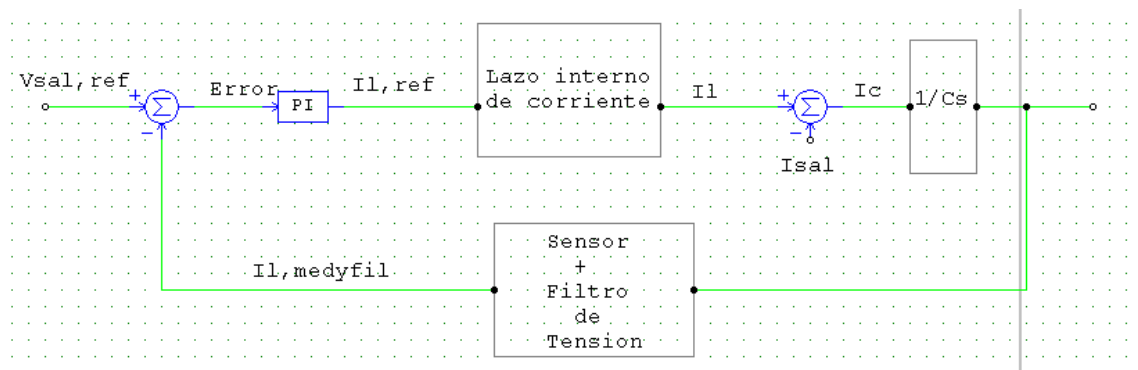


Fig 1.26 diagrama de bloques del lazo de tensión

Como se puede observar el lazo de tensión esta formado por los siguientes bloques:

- Planta
- Lazo interno de corriente
- Bloque sensor y filtro
- Controlador PI

Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión

Planta convertidor

La corriente en la inductancia viene dada por el lazo interno de corriente en la planta del convertidor lo que nos interesa es la corriente que circula por el condensador, pues bien se observa que $I_c = I_L - I_{sa1}$ obteniendo el siguiente diagrama de bloques

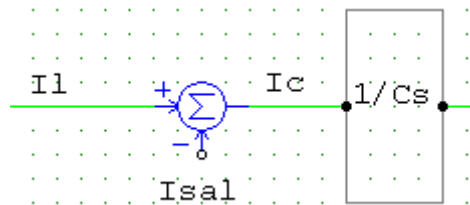


Fig 1.27 Bloque planta convertidor

Bloque lazo interno de corriente

El lazo interno de corriente ya lo hemos explicado en el apartado anterior, se encarga de controlar la corriente en la inductancia a partir de una corriente de referencia dada por el controlador de tensión.

A la hora de representarlo para obtener la función de transferencia en lazo abierto lo representaremos de la siguiente manera:

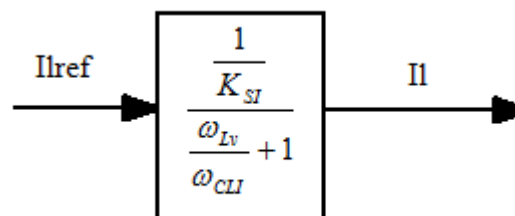


Fig 1.28 Lazo interno de corriente

Bloque sensor + filtro

Este bloque se encarga de medir la señal y adecuarla a unos valores a la que sea posible conectar los equipos de medida sin dañarlos. Además de medir la señal la pasamos por un filtro paso bajo para evitar así componentes indeseadas que perturben la medida de la señal a medir.

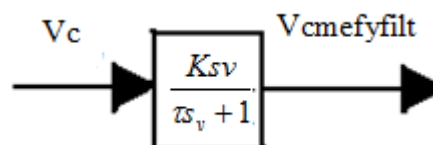


Fig 1.29 Bloque sensor + Filtro

Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión

En nuestro caso utilizaremos un divisor de tensión para medir la tensión en el condensador.

- K_{sv} es la ganancia del sensor (un escalamiento entre Voltios y Voltios)
- $\tau_v = \frac{1}{\omega_{cfv}}$ donde ω_{cfv} es la ω de corte del filtro de tensión
- s es la variable en el dominio de Laplace (en el dominio de frecuencia equivale a $2\pi f\omega_{Lv}$ donde ω_{Lv} es la ω del lazo de tensión

En el apartado de diseño se especificaran todas las ω

Bloque Controlador PI

El controlador PI es el encargado de la velocidad del lazo y de dar estabilidad al sistema. La presencia de un regulador de control elimina en todo momento el error entre las referencias a seguir y las medidas obtenidas con los sensores.

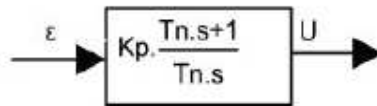


Fig 1.30 Bloque PI

Un regulador PI tiene dos parámetros que se calculan estableciendo dos condiciones importantes en el sistema: rapidez y estabilidad. Esto se explicara una vez obtenida la función de transferencia en lazo abierto.

La función de transferencia en lazo abierto resultante del conjunto de bloques que componen el lazo de tensión es:

$$FT_{LA} = \frac{K_p \cdot K_{sv}}{K_{sc} \cdot V_{PT} \cdot C \cdot Tn} \cdot \frac{1}{s^2} \cdot (Tns + 1) \cdot \frac{1}{\tau_v + 1} \cdot \frac{1}{\frac{\omega_{lv}}{\omega_{cli}} + 1}$$

Una vez obtenida la función de transferencia el objetivo será buscar los parámetros del PI (K_p y Tn). La constante K_p es la que va a aportar la rapidez del lazo y la Tn es la que va a aportar estabilidad.

Como calcular el lazo:

- Criterio de estabilidad

$$-180 + MF = \arctg(Tns) - 180 - \arctg\left(\frac{s}{\omega_{cfv}}\right) - \arctg\left(\frac{s}{\omega_{cli}}\right)$$

Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión

De esta ecuación sacamos el parámetro Tn (donde el MF estará comprendido entre 40° y 60°)

➤ Criterio de rapidez

$$FT_{LA} = \frac{K_p \cdot K_{sv}}{K_{sc} \cdot V_{PT} \cdot C \cdot Tn} \cdot \frac{1}{s^2} \cdot \sqrt{(Tns)^2 + 1} \cdot \frac{1}{\sqrt{(\omega_v)^2 + 1}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\omega_v}{\omega_{cli}}\right)^2 + 1}}$$

En esta ecuación $FT_{LA}=1$ y despejamos Kp

Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión

2. DISEÑO DEL CONVERTIDOR

2.1 FORMAS DE ONDA

Antes de ponernos a calcular todos los parámetros y elementos de nuestro convertidor conviene detenerse un momento y pensar como se va a comportar nuestro convertidor y que formas de onda van a ver los componentes que lo forman, ya que así será mucho más sencillo calcular sus componentes.

Partimos del siguiente circuito:

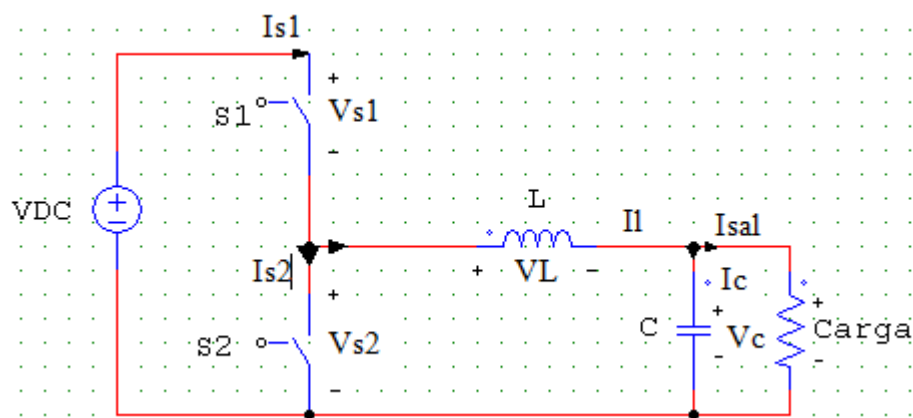


Fig 2.1 Circuito DC/DC reductor

La orden de encendido de los interruptores la da un circuito de control, que comparará dos tensiones, una triangular y otra continua. Esta comparación nos dará una función F de onda cuadrada que tomara valores entre 0 y 1. Cuando $F=1$ $S1$ conducirá y cuando $F=0$ $S2$ conducirá. Pues bien vamos a analizar los componentes y sus respectivas formas de onda.

➤ Circuito Comparador

Como ya hemos explicado el circuito comparador está formado por un comparador al que le llegan 2 tensiones una continua y otra triangular. Veamos en la figura 2.2 el circuito y la función de encendido de los semiconductores.

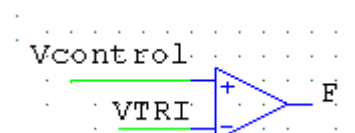


Fig 2.2 Circuito comparador

Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión

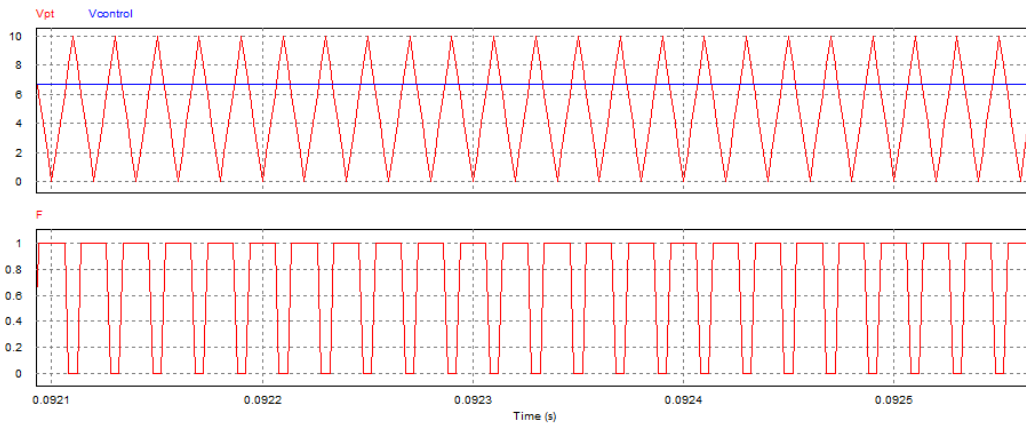


Fig 2.3 Onda F

Una vez obtenida la onda F es fácil obtener las demás ondas de los demás elementos mediante teoría de circuitos.

❖ Si encendido (Conduce S1 y S2 está en corte)

A este periodo de tiempo lo denominaremos T_{on}

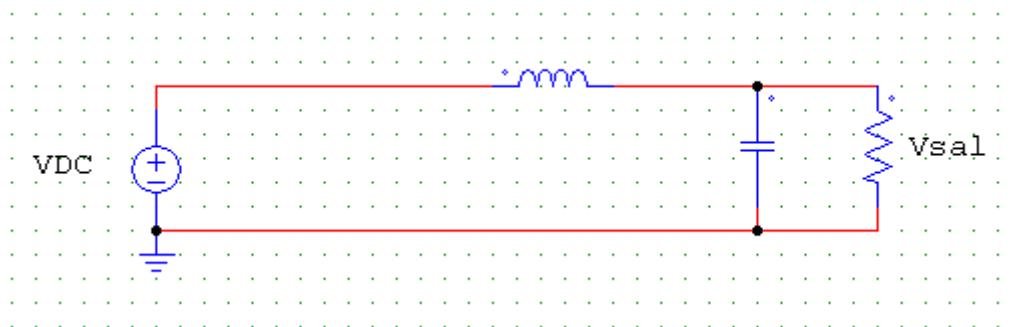


Fig 2.4 Circuito Ton

❖ S1 apagado (Conduce S2 y S1 en corte)

A este periodo de tiempo lo denominaremos T_{off}

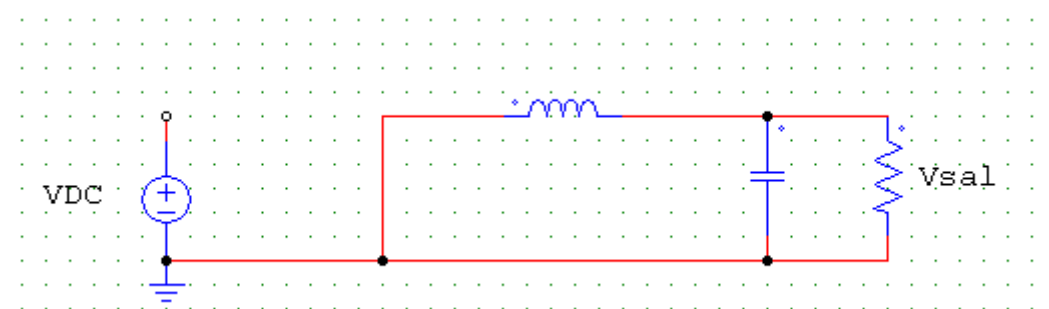


Fig 2.5 Circuito Toff

Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión

➤ tensión en la inductancia

$$V_L \text{ en } T_{on} \rightarrow V_L = V_{DC} - V_{SAL}$$

$$V_L \text{ en } T_{off} \rightarrow V_L = -V_{SAL}$$

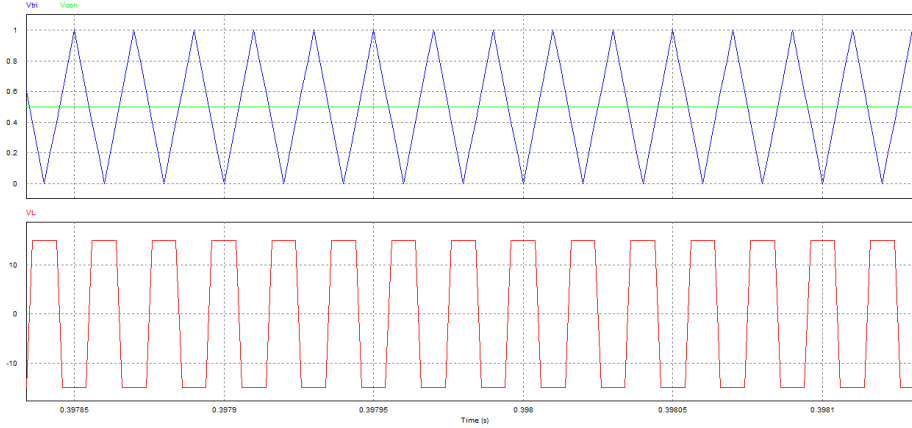


Fig 2.6 tensión en la inductancia

$$\begin{aligned} \langle V_L \rangle &= \frac{1}{T_{con}} \int V_L \cdot dt = \frac{1}{T} \left(\int_0^{T_{on}} V_L \cdot dt + \int_{T_{on}}^{T_{off}} V_L \cdot dt \right) = \frac{1}{T_{con}} \left(\int_0^{T_{on}} (V_{DC} - V_{sal}) \cdot dt + \int_{T_{on}}^{T_{off}} -V_{sal} \cdot dt \right) = \\ &= \frac{1}{T_{con}} \left((V_{DC} - V_{sal}) \cdot T_{on} + [-V_{sal} \cdot T_{off} + V_{sal} \cdot T_{on}] \right) \\ \langle V_L \rangle &= \frac{(V_{DC} - V_{Sal}) \cdot T_{on} + (-V_{sal}) \cdot T_{off}}{T_{con}} \end{aligned}$$

Sabemos que el valor medio de la tensión en una inductancia es 0 por lo tanto:

$$\begin{aligned} 0 &= V_{Dc} \cdot T_{on} - V_{sal} \cdot T_{on} - V_{sal} \cdot T_{off} \\ 0 &= V_{Dc} \cdot T_{on} - V_{sal} \cdot (T_{on} + T_{off}) \\ 0 &= V_{Dc} \cdot T_{on} - V_{sal} \cdot T_{Con} \\ V_{sal} &= V_{Dc} \cdot \frac{T_{on}}{T_{Con}} = V_{Dc} \cdot D \end{aligned}$$

➤ Corriente en la inductancia

Tanto en ton como en toff $i_l = i_c + i_{sal}$

Se sabe que la corriente en un condensador en valor medio es 0, por lo tanto

$$i_l = i_{sal} \text{ donde } i_{sal} = \frac{V_{sal}}{Rc \arg a}$$

Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión

Por lo tanto el valor medio de la corriente en la inductancia va a ser igual al de la corriente de salida solo que hay que tener en cuenta el rizado provocado por la modulación PWM

Rizado en la inductancia:

Se puede demostrar fácilmente mediante la ecuación de la inductancia.

$$V_L = L \cdot \frac{dI_L}{dt}$$

Donde:

V_L es la tensión de la inductancia
 L el coeficiente de inducción en
 dI_L la variación de la corriente
 dt la variación de tiempo

Durante t_{on} $V_L = V_{DC} - V_{SAL}$ (V_L es positivo ya que V_{SAL} nunca es mayor a V_{DC})

Si V_L es positivo y L es una constante $\frac{dI_L}{dt} \approx \uparrow$ (La I_L aumenta con el tiempo)

Durante $t_{off} = -V_{SAL}$ (V_L es negativo)

Si V_L es negativo y L es una constante $\frac{dI_L}{dt} \approx \downarrow$ (la I_L disminuye con el tiempo)

Veamos en la figura 2.7 lo explicado

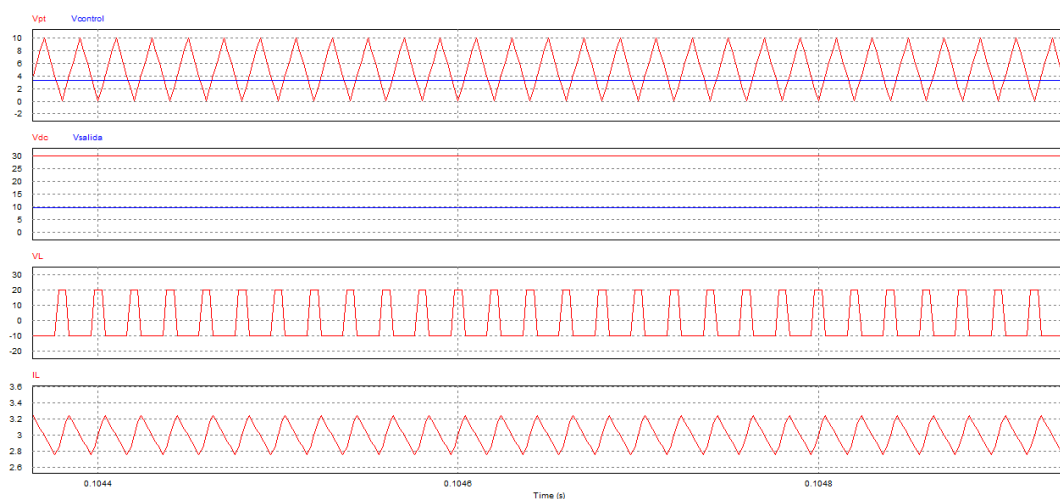


Fig 2.7 Rizado de corriente

En la figura 2.7 se ve perfectamente todo lo explicado anteriormente. Mediante la técnica PWM observamos que en ton V_L es positiva y en toff es negativa, viendo así la variación correspondiente a cada caso denominado rizado de corriente.

Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión

Vamos a analizar el rizado de corriente durante el periodo t_{on} (podríamos analizarlo también durante t_{off})

Hemos dicho que la tensión en la inductancia corresponde a la siguiente formula:

$$V_L = L \cdot \frac{dI_L}{dt}$$

Pues bien vamos a aplicarla durante el periodo t_{on}

$$V_{DC} - V_{SAL} = L \cdot \frac{dI_L}{dt}$$

Donde:

$$V_{SAL} = V_{DC} \cdot D$$

$$dI_L = \Delta I_L$$

$$dt = t_{on}$$

Aplicando los cambios:

$$V_{DC}(1-D) = L \cdot \frac{\Delta I_L}{t_{on}} \quad \frac{V_{DC}(1-D) \cdot t_{on}}{L} = \Delta I_L$$

Donde:

$$t_{on} = D \cdot t_{con}$$

$$t_{con} = \frac{1}{f_{con}}$$

Aplicando los cambios:

$$\frac{V_{DC}(1-D) \cdot D}{L \cdot f_{con}} = \Delta I_L$$

Pues bien a partir de esta formula podemos conocer el rizado máximo que vamos a obtener en nuestro convertidor. El valor máximo de rizado en la inductancia se

produce cuando la $\frac{d\Delta I_L}{dD} = 0$

$$\frac{d\Delta I_L}{dD} = \frac{V_{DC} [(-D) + (1-D)]}{L \cdot f_{con}} = \frac{V_{DC} \cdot (1-2D)}{L \cdot f_{con}} = 0$$

$$V_{DC} \cdot (1-2D) = 0 \quad D_{\max} = \frac{1}{2}$$

El valor máximo del rizado de corriente en nuestro convertidor se dará para un ciclo de trabajo de 0,5.

Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión

$$\Delta I_{L\max} = \frac{V_{DC}}{4 \cdot L \cdot f_{con}}$$

Una vez conocido el valor I_L con su respectivo rizado veamos su forma de onda respecto a la I_{sal} en la fig 2.8 y podremos comprobar que en efecto I_{sal} es el valor medio de la inductancia.

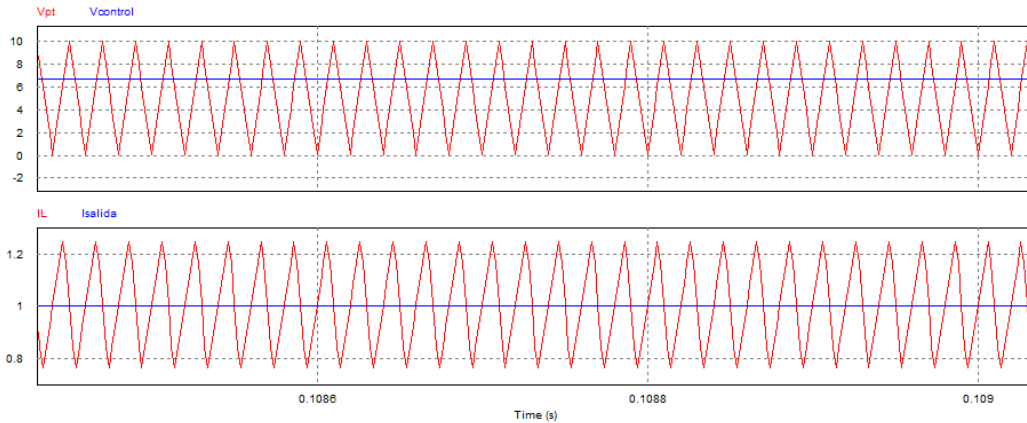


Fig 2.8 Onda I_L con su respectivo rizado

➤ Corriente en el condensador

$$i_c = i_L - i_{sal} \Rightarrow T_{on}$$

$$i_c = i_L - i_{sal} \Rightarrow T_{off}$$

Tal y como hemos explicado en el apartado anterior el valor medio de corriente en un condensador es 0, por lo que el valor de la corriente en condensador va a ser el valor del rizado de la corriente en la inductancia.

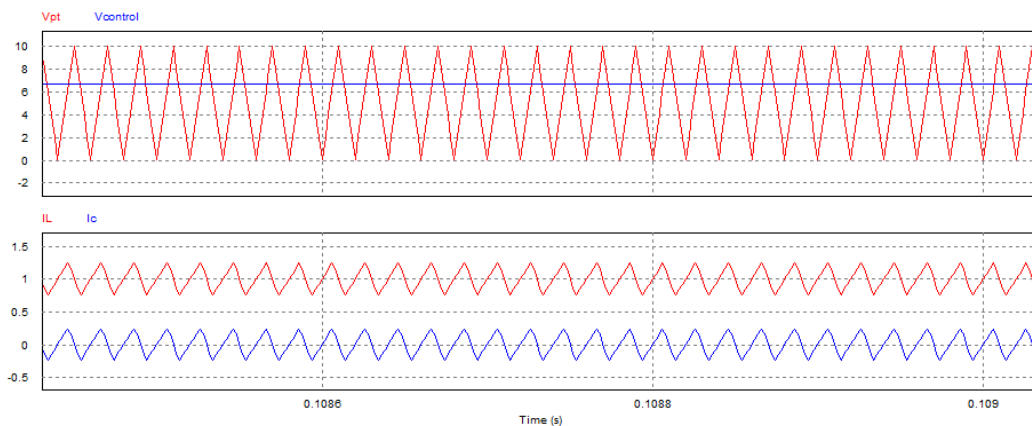


Fig 2.9 Onda de Corriente en el condensador

Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión

Pues bien como se puede apreciar en la figura 2.9 tanto la corriente en la inductancia como en el condensador son iguales, solo que la corriente en la inductancia oscila en torno al valor de la corriente de salida y la corriente en el condensador oscila en torno a 0.

➤ tensión en el condensador

Tanto en ton como en toff el valor de la tensión en el condensador va ser igual a la tensión de salida, que vendrá impuesta o por las características del circuito o por el control que nosotros impongamos, pero cabe destacar que esta tensión va a tener un rizado ya que va a absorber corriente con rizado.

Rizado de tensión:

El valor máximo de rizado en la capacidad se dará cuando el valor de rizado en la inductancia sea el máximo, ya que la corriente en el condensador es precisamente el rizado de corriente en la inductancia.

$$\Delta Q = C \cdot \Delta V_C \quad \Delta V_C = \frac{1}{C} \cdot \Delta Q = \frac{1}{C} \cdot \frac{t_{con}}{2} \cdot \frac{\Delta I_L}{2} = \frac{t_{con} \cdot \Delta I_L}{8 \cdot C} = \frac{\Delta I_L}{8 \cdot C \cdot f_{con}}$$
$$\Delta V_C = \frac{\Delta I_L}{8 \cdot C \cdot f_{con}} \quad \Delta V_C \max = \frac{\Delta I_{L \max}}{8 \cdot C \cdot f_{con}} = \frac{\frac{V_{DC}}{4 \cdot L \cdot f_{con}}}{8 \cdot C \cdot f_{con}} = \frac{V_{DC}}{32 \cdot C \cdot L \cdot f_{con}^2}$$
$$\Delta V_C \max = \frac{V_{DC}}{32 \cdot C \cdot L \cdot f_{con}^2}$$

Veamos a continuación en la fig 2.10 el rizado tanto de corriente en la inductancia como de tensión en el condensador.

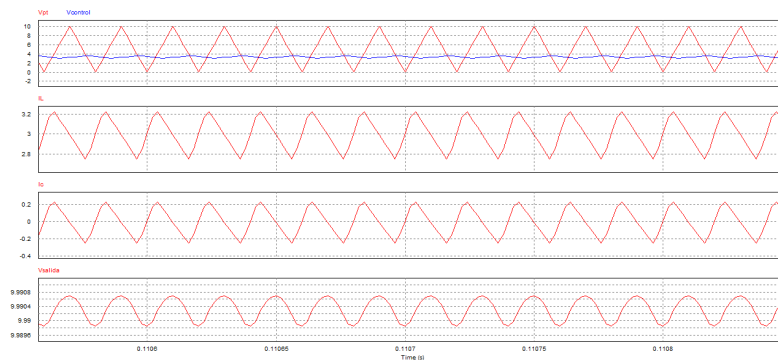


Fig 2.10 Rizado de corriente y de tensión

Veamos pues la onda de tensión en el condensador sin hacer el zoom, parece una continua casi perfecta, pero hay que tener en cuenta que tiene rizado.

Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión

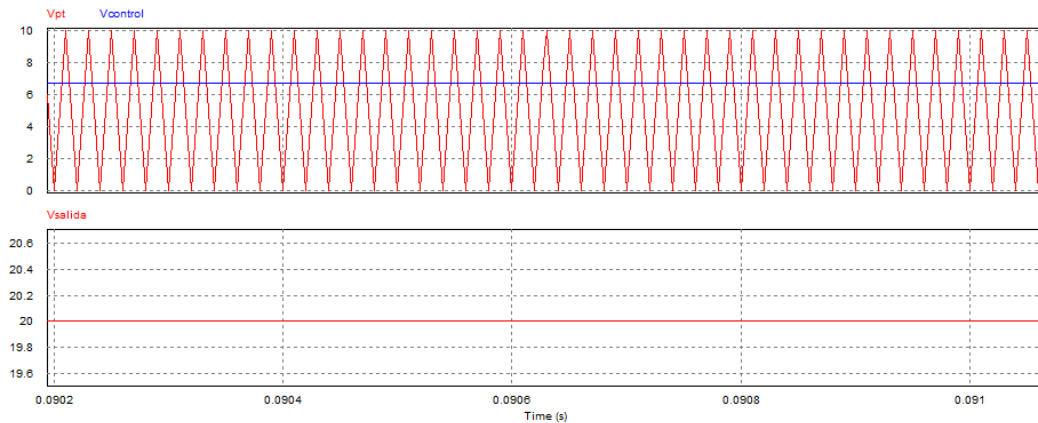


Fig 2.11 tensión de salida o del condensador

➤ **tensión y Corriente en s1**

Durante t_{on} s1 esta cerrado y su tensión es 0, siendo su corriente la corriente que circula por la inductancia

Durante t_{off} s1 esta abierto y su tensión es V_{dc} mientras que su corriente es 0.

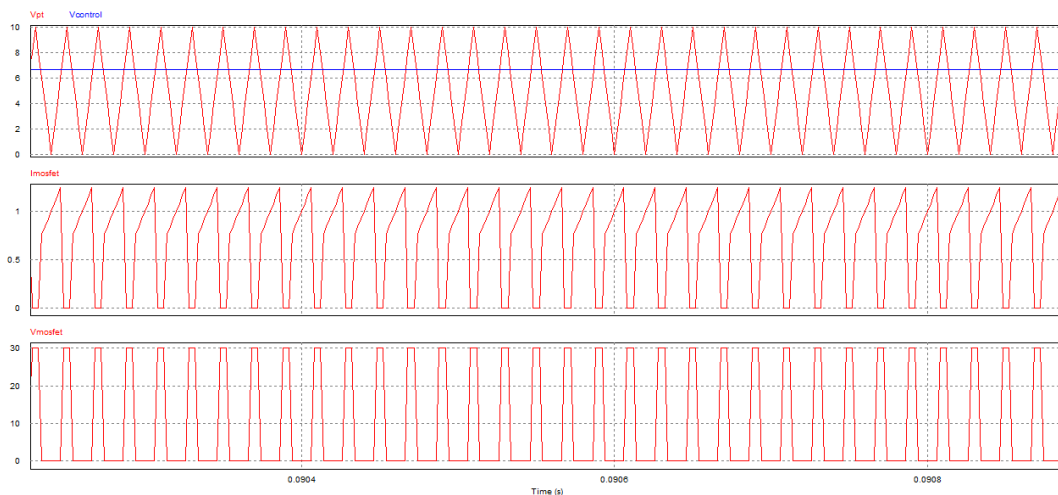


Fig 2.12 tensión y corriente perteneciente a S1

➤ **tensión y corriente en s2**

Durante t_{on} s2 esta abierto y su tensión es V_{dc} , siendo su corriente 0

Durante t_{off} s2 esta cerrado y su tensión es 0 mientras que su corriente es la corriente que circula por la inductancia pero con signo negativo.

Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión

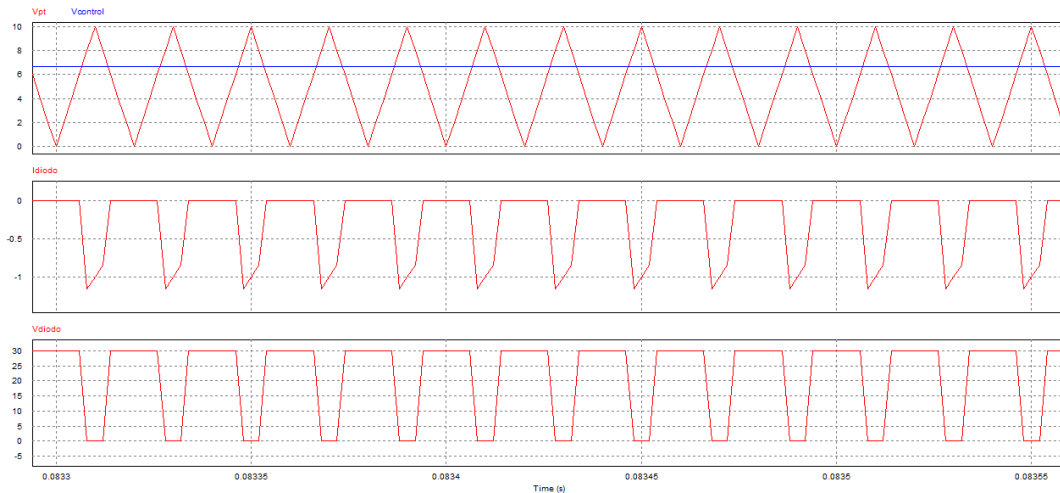


Fig 2.13 tensión y corriente de S2.

2.2 DIMENSIONADO DE LOS ELEMENTOS DE LA PLANTA DEL CONVERTIDOR

Datos de partida:

Tenemos un convertidor DC/DC reductor de 30w de potencia nominal, la tensión de entrada es de 30 voltios y la tensión de salida será de 10V. La fcon escogida es de 50Khz.

2.2.1 CALCULO DE LA INDUCTANCIA

A la hora de calcular la inductancia es necesario saber cual va a ser la corriente nominal que va a circular por ella:

$$I_{sal} = \frac{P_n}{V_{sal \min}} = \frac{30w}{10V} = 3A$$

Sabiendo que la corriente de salida es de 3A sabemos que el valor medio de la corriente en la inductancia será de 3A.

Hemos escogido que el rizado máximo de corriente va a ser del 20% por lo tanto:

$$\Delta I_{L \max} = 20\% \cdot 3A = 0.6A$$

Una vez conocido el rizado podemos calcular la inductancia mediante la siguiente formula:

$$\Delta I_{L \max} = \frac{V_{DC}}{4 \cdot L \cdot f_{con}} \Rightarrow L = \frac{V_{DC}}{4 \cdot \Delta I_{L \max} \cdot f_{con}} = \frac{30V}{4 \cdot 0.6A \cdot 50000Hz} = 0.25mH$$

Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión

2.2.2 CALCULO DEL CONDENSADOR

Existen 3 métodos para calcular el condensador:

- Por rizado

Este método en este trabajo no lo vamos a utilizar ya que con los otros dos métodos sale un condensador de mayor tamaño, así que lo desechamos.

- Por el filtro de salida LC

El convertidor forma un filtro de salida LC por lo que obteniendo un parámetro como es la inductancia podemos obtener el otro mediante las formulas de filtros LC.

$$f_{corte_{filtroLC}} = \frac{1}{10} f_{con} \Rightarrow f_{corte_{filtroLC}} = \frac{1}{10} 50000 = 5000 Hz$$

$$f_{corte_{filtroLC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \Rightarrow \frac{1}{\sqrt{LC}} = 5000 \cdot 2\pi \Rightarrow \left(\frac{1}{\sqrt{LC}}\right)^2 = (5000 \cdot 2\pi)^2$$

$$C = \frac{1}{(5000 \cdot 2\pi)^2 \cdot L} = \frac{1}{(5000 \cdot 2\pi)^2 \cdot 0.25 \times 10^{-3}} = 4.053 \mu F$$

- Por que la máxima variación de la tensión de un escalón de carga sea <0.3V

Partimos del siguiente lazo de control (lazo de tensión)

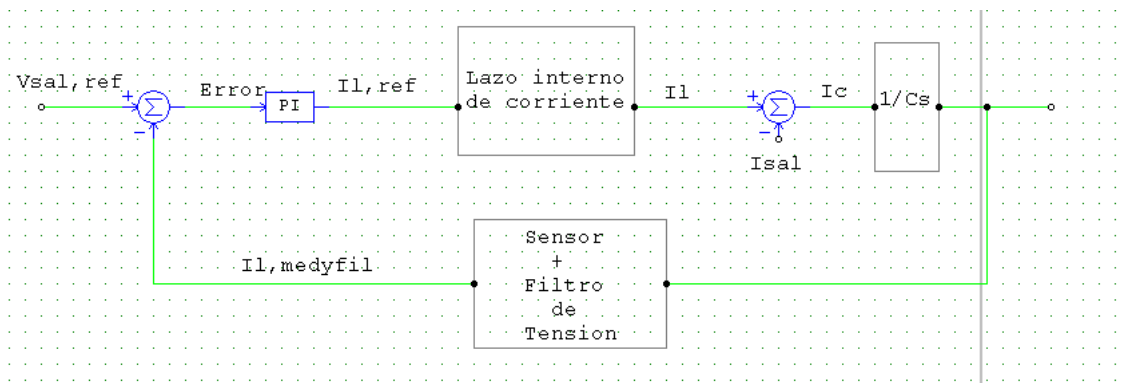


Fig 2.14 Lazo de tensión dc/dc

Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión

Ignoramos el filtro y dibujamos el lazo desde la perturbación:

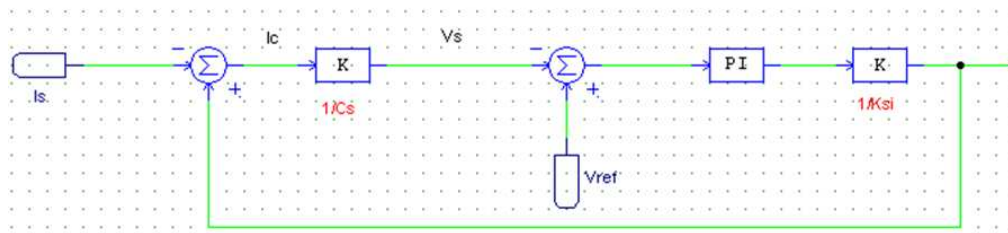


Fig 2.14 Lazo visto desde la perturbación

$$\begin{aligned}
 Vs &= -\frac{1}{Cs} \cdot Is - Vs \cdot PI \cdot \frac{1}{Ksi} \cdot \frac{1}{Cs} \\
 Vs + Vs \cdot PI \cdot \frac{1}{Ksi} \cdot \frac{1}{Cs} &= -\frac{1}{Cs} \cdot Is \\
 Vs \left(1 + PI \cdot \frac{1}{Ksi} \cdot \frac{1}{Cs}\right) &= -\frac{1}{Cs} \cdot Is \\
 Vs &= \frac{-Is}{Cs \cdot \left(1 + \frac{PI}{Ksi \cdot Cs}\right)} = \frac{-Is \cdot Ksi \cdot Cs}{Cs \cdot (Ksi \cdot Cs + PI)} \\
 Vs &= \frac{-Is \cdot Ksi}{Ksi \cdot Cs + PI} \quad \frac{Vs}{Is} = \frac{-Ksi}{Ksi \cdot Cs + PI} \rightarrow \text{Ecuación 1}
 \end{aligned}$$

Despejamos Kp y Ki $\rightarrow PI = Kp + \frac{Ki}{s}$

$$FT_{LA} = \left(Kp + \frac{Ki}{s}\right) \cdot \frac{1}{Cs} \cdot \frac{1}{Ksi}$$

$$MF = \arctg\left(\frac{W_L \cdot Kp}{Ki}\right)$$

El margen de fase es de 55°, la frecuencia del lazo de tensión 500Hz y $W_L = 2\pi 500$

$$55^\circ = \arctg\left(\frac{(2 \cdot \pi \cdot 500 \cdot Kp)}{Ki}\right)$$

$$1,428 = \frac{W_L \cdot Kp}{Ki} \quad Ki = \frac{W_L \cdot Kp}{1,428}$$

$$1 = \frac{\sqrt{(W_L \cdot Kp)^2 + Ki^2}}{Ksi \cdot C \cdot W_L^2}$$

Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión

Introducimos en la ecuación el valor obtenido anteriormente de Ki

$$1 = \frac{\sqrt{(W_L \cdot K_p)^2 + \left(\frac{W_L \cdot K_i}{1,428}\right)^2}}{K_{si} \cdot C \cdot W_L^2} \rightarrow \text{Despejando nos queda:}$$

$$K_p = \frac{K_{si}}{1,22} \cdot C \cdot W_L$$

Con estos valores volvemos a la ecuación 1

$$\frac{V_s}{1s} = \frac{-K_{si}}{K_{si} \cdot C s + P I} \quad \text{Donde } P I = K_p + \frac{K_i}{s} \text{ y se sustituyen los valores}$$

$$\frac{V_s}{1s} = \frac{-K_{si}}{K_{si} \cdot C s + \left(K_p + \frac{K_i}{s}\right)} = \frac{-K_{si} \cdot s}{K_{si} \cdot C s^2 + K_p s + K_i}$$

Ahora sustituimos los valores Kp y Ki por los hallados anteriormente:

$$\frac{V_s}{1s} = \frac{-K_{si} \cdot s}{K_{si} \cdot C s^2 + \frac{K_{si}}{1,22} \cdot C \cdot W_L \cdot s + \frac{K_{si}}{1,743} \cdot C \cdot W_L^2}$$

$$\frac{V_s}{1s} = \frac{-s}{C \cdot \frac{W_L^2}{1,743} \cdot \left(\frac{1,743 \cdot s^2}{W_L^2} + \frac{1,429 \cdot s}{W_L} + 1\right)}$$

Despejamos Vs y lo dejamos en función de s

$$V_s(s) = \frac{s \cdot 1s(s)}{C \left(s^2 + 0,8199 \cdot W_L \cdot s + \frac{W_L^2}{1,743}\right)}$$

Comparamos las 2 ecuaciones:

$$V_s(s) = \frac{-s \cdot 1s(s)}{C \left(s^2 + 0,8199 \cdot W_L \cdot s + \frac{W_L^2}{1,743}\right)}$$

$$V_s(s) = \frac{-s \cdot 1s(s)}{C(s^2 + 2 \cdot \xi \cdot W_n \cdot s + W_n^2)}$$

Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión

Obtenemos las siguientes ecuaciones:

$$0.819\omega_L = 2\xi \cdot \omega_n$$

$$\frac{\omega_L^2}{1.74261} = \omega_n^2$$

$$\omega_n = \frac{\omega_L}{\sqrt{1.742}}$$

$$\xi = \frac{0.819\omega_L}{2\omega_n}$$

Obtenemos así los siguientes valores:

$$\omega_n = 2379.85 \text{ rad / seg}$$

$$\xi = 0.54057$$

Del libro de automática obtenemos la siguiente ecuación:

$$Vs = \frac{-\Delta I}{C \cdot Wn \cdot \sqrt{1 - \xi^2}} \cdot e^{-Wn \cdot t} \cdot \text{sen} \left(Wn \cdot t \cdot \sqrt{1 - \xi^2} \right)$$

La derivamos respecto del tiempo:

$$\begin{aligned} \frac{dVs}{dt} &= \frac{-\Delta I}{C \cdot Wn \cdot \sqrt{1 - \xi^2}} \left[e^{-Wn \cdot t} \cdot (-Wn) \cdot \text{sen} \left(Wn \cdot t \cdot \sqrt{1 - \xi^2} \right) \right. \\ &\quad \left. + e^{-Wn \cdot t} \cdot \cos \left(Wn \cdot t \cdot \sqrt{1 - \xi^2} \right) \cdot \left(Wn \cdot \sqrt{1 - \xi^2} \right) \right] \\ \frac{-\Delta I}{C \cdot Wn \cdot \sqrt{1 - \xi^2}} &\left[e^{-Wn \cdot t} \cdot (-Wn) \cdot \text{sen} \left(Wn \cdot t \cdot \sqrt{1 - \xi^2} \right) + e^{-Wn \cdot t} \right. \\ &\quad \left. \cdot \cos \left(Wn \cdot t \cdot \sqrt{1 - \xi^2} \right) \cdot \left(Wn \cdot \sqrt{1 - \xi^2} \right) \right] - 0 \end{aligned}$$

Operando nos queda:

$$\tan \left(Wn \cdot t \cdot \sqrt{1 - \xi^2} \right) = \sqrt{1 - \xi^2}$$

Despejamos el tiempo:

$$t = \frac{\arctan \left(\sqrt{1 - \xi^2} \right)}{Wn \cdot \sqrt{1 - \xi^2}}$$

Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión

Sustituimos el valor de t en la ecuación obtenida del libro de automática y operamos:

$$V_s = \frac{-\Delta I}{C \cdot W_n \cdot \sqrt{1 - \xi^2}} \cdot e^{\left(-W_n \cdot \left(\frac{\arctan(\sqrt{1 - \xi^2})}{W_n \cdot \sqrt{1 - \xi^2}} \right) \right)} \cdot \sin \left(W_n \cdot \left(\frac{\arctan(\sqrt{1 - \xi^2})}{W_n \cdot \sqrt{1 - \xi^2}} \right) \cdot \sqrt{1 - \xi^2} \right)$$

Y obtenemos:

$$\Delta V_s = -\Delta I \cdot \frac{0,333}{C \cdot W_n}$$

Siendo:

$$\Delta V_s = 0.3V$$

$$\omega_n = 2379.85 \text{ rad / seg}$$

$$\Delta I = 3A$$

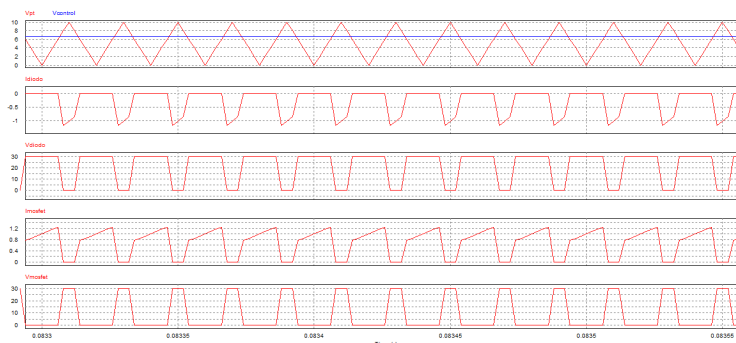
$$C = \frac{\Delta I}{E \omega_n} \cdot 0.333 = 1400.16 \mu F \approx 1500 \mu F$$

Nos quedaremos con el condensador de $1500 \mu F$

2.2.3 ELECCION DE LOS SEMICONDUCTORES DE POTENCIA

Para escoger los semiconductores de potencia que mejor se adapten a nuestro circuito, es necesario observar tanto los valores de tensión como los de corriente que verán tanto $s1$ como $s2$ en ton y toff.

Ya se ha explicado en el apartado 2.1 las formas de onda, tanto tensiones como corrientes que verán los semiconductores, pero lo volveremos a mostrar en la siguiente figura:



Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión

Figura 2.15

En la figura 2.15 nos muestra lo siguiente:

S1 soportara tensiones positivas y corrientes positivas por lo que su diagrama de segmentos es el siguiente:

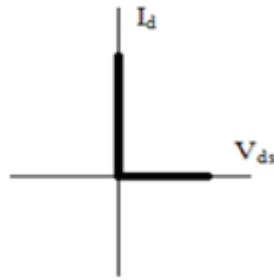


Fig 2.16 Diagrama de segmentos de S1

Este diagrama se corresponde con el de un Mosfet, por lo que s1 será un Mosfet

S2 soportara tensiones positivas y corrientes negativas por lo que su diagrama de segmentos es el siguiente:

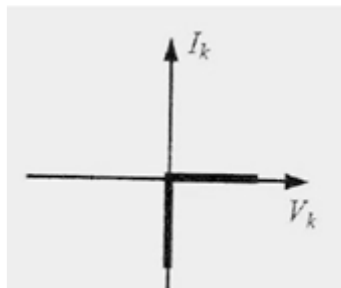


Fig 2.17 diagrama de segmentos de S2

Este diagrama se corresponde con el de un diodo invertido, por lo que s2 será un diodo.

2.3 DISEÑO DEL CONTROL DEL CONVERTIDOR

En este trabajo fin de master, ya que no ha sido posible realizar el montaje real del convertidor, se va a realizar el control de varias formas diferentes:

- Control sin rechazo de perturbaciones
 - Control mediante bloques
- Control con rechazo de perturbaciones
 - Control mediante bloques
 - Control analógico

Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión

2.3.1 CONTROL SIN RECHAZO DE PERTURBACIONES

Dentro de este apartado vamos a calcular todos los componentes necesarios para realizar el control del convertidor sin rechazar las perturbaciones. Primero realizaremos el control mediante los diagramas de bloques y simularemos en Psim.

En nuestro caso hemos establecido los siguientes valores para las frecuencias de corte:

Frecuencia filtro tensión (f_{cfv})=5000Hz

Frecuencia del filtro de corriente (f_{cfi})=2000Hz

Frecuencia del lazo de tensión (f_{lv})=5000Hz

Frecuencia del lazo de corriente (f_{li})=500Hz

El margen de fase (MF) tanto para corriente como para tensión es de 55°

Control sin rechazo de perturbaciones mediante bloques

Un diagrama de bloques es una representación gráfica y abreviada de la relación de causa y efecto entre la entrada y la salida de un sistema físico. Proporciona un método útil y conveniente para caracterizar las relaciones funcionales entre los diversos componentes de un sistema de control. Los componentes del sistema se llaman de manera alterna elementos del sistema. La forma más simple de un diagrama de bloques es un solo bloque, con una entrada y una salida, como se ve a continuación:

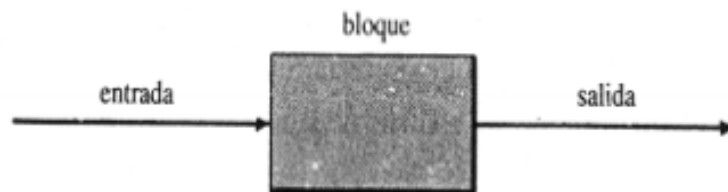


Fig 2.18 Bolque

En el interior del rectángulo que representa el bloque, usualmente contiene la descripción o el nombre del elemento, o el símbolo de la operación matemática que se va a efectuar sobre la entrada para producir la salida. Las flechas representan la dirección de la información o flujo de la señal.

Lo primero que calcularemos será el lazo de corriente y luego el lazo de tensión, puesto que ambos lazos irán en cascada. En nuestro caso hemos establecido los siguientes valores para las frecuencias de corte:

Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión

Lazo de Corriente

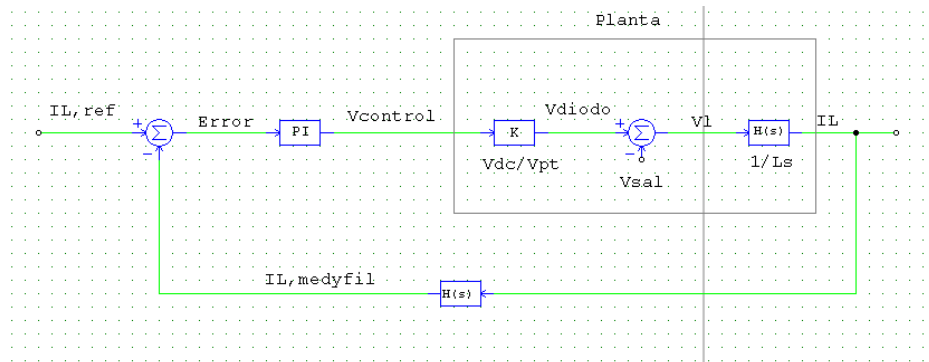


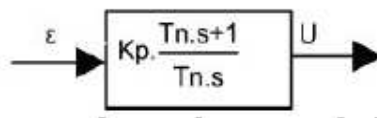
Fig 2.19 Lazo de corriente

En el siguiente diagrama de bloques tenemos los siguientes Bloques:

- PI
- Planta (célula + Inductancia)
- Sensor + Filtro

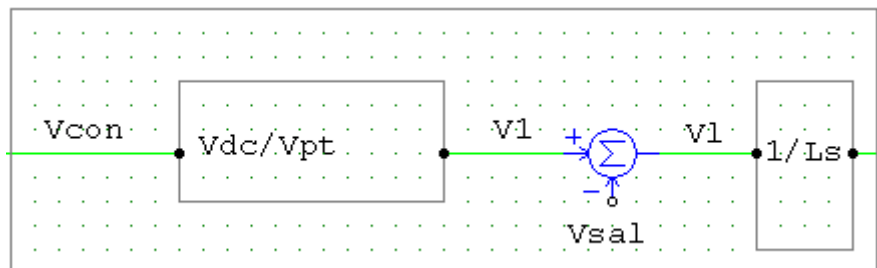
Bloque PI

El bloque PI corresponde a un controlador proporcional integral, por lo tanto responde a la siguiente función:



Planta

La planta nos muestra el funcionamiento del convertidor como ya se explicó anteriormente en el apartado 1. Nos da el siguiente bloque:

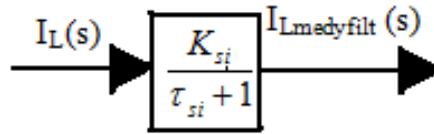


Sensor +Filtro

Se encarga de adecuar la señal a los niveles requeridos para que se pueda controlar en el circuito de control, básicamente lo que hace es escalar el valor de la corriente a un valor

Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión

de tensión y adecuarlo para eliminar componentes no deseadas. Su bloque es el siguiente:



K_{si} está escalada, la corriente nominal que va a pasar por nuestra inductancia es de 3 A y la tensión máxima a la que vamos a trabajar con los parámetros de electrónica es a 10 V.

Por lo tanto $K_{si} = \frac{10V}{3A} = 3.333$

Una vez obtenido la función de todos los bloques lo que hacemos es obtener la función de transferencia en lazo abierto completa de todo el sistema, que será la siguiente:

$$FT_{LA} = \frac{K_P \cdot K_{SI} \cdot V_{DC}}{V_{PT} \cdot L \cdot Tn} \cdot \frac{1}{s^2} \cdot (Tns + 1) \cdot \frac{1}{\tau_{SI} + 1}$$

Calculo Tn :

$$-180 + MF = \arctg(Tns) - 180 - \arctg\left(\frac{s}{\omega_{cfi}}\right)$$

$$55 = \arctg(Tn2\pi2000) - \arctg\left(\frac{2\pi2000}{2\pi5000}\right)$$

$$55 = \arctg(Tn2\pi2000) - 21.80$$

$$76.80 = \arctg(Tn2\pi2000)$$

$$\tan(76.80) = Tn2\pi2000$$

$$Tn = 3.39 \times 10^{-4}$$

Calculo de Kp :

$$FT_{LA} = \frac{K_P \cdot K_{SI} \cdot V_{DC}}{V_{PT} \cdot L \cdot Tn} \cdot \frac{1}{\omega_{Li}^2} \cdot \sqrt{\frac{(Tns)^2 + 1}{(\tau_{SI})^2 + 1}}$$

$$1 = \frac{K_P \cdot 3.3 \cdot 30}{10 \cdot 0.25 \times 10^{-3} \cdot 3.39 \times 10^{-4}} \cdot \frac{1}{(2\pi2000)^2} \cdot \sqrt{\frac{(3.39 \times 10^{-4} \cdot 2\pi2000)^2 + 1}{\left(\frac{2000}{5000}\right)^2 + 1}}$$

$$Kp = 0.33275$$

Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión

Observamos la implementación del bloque de corriente mediante bloques:

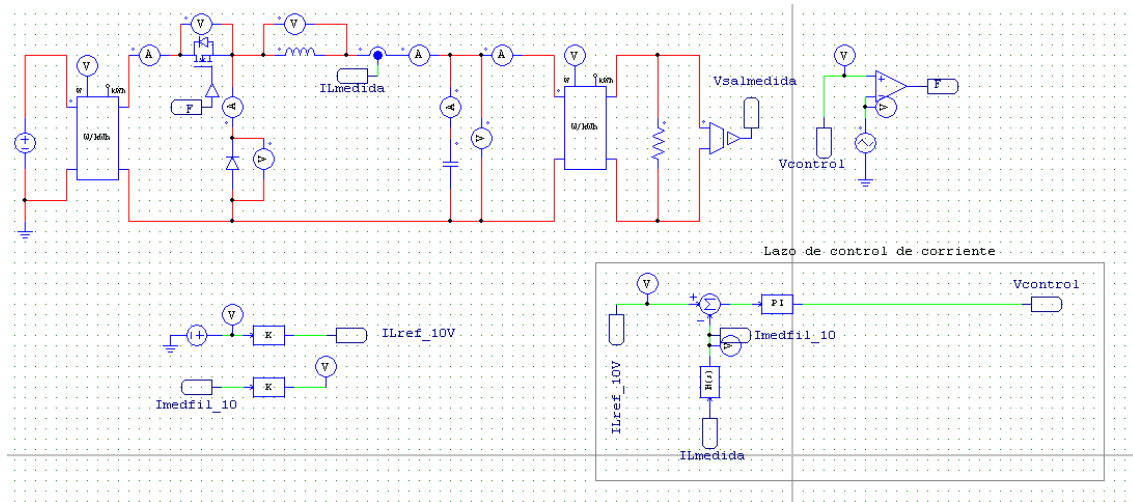


Fig 2.20 Lazo de corriente

Veamos su funcionamiento

Introducimos un escalón de corriente de 0 a 3A y vemos la respuesta del sistema frente al escalón:

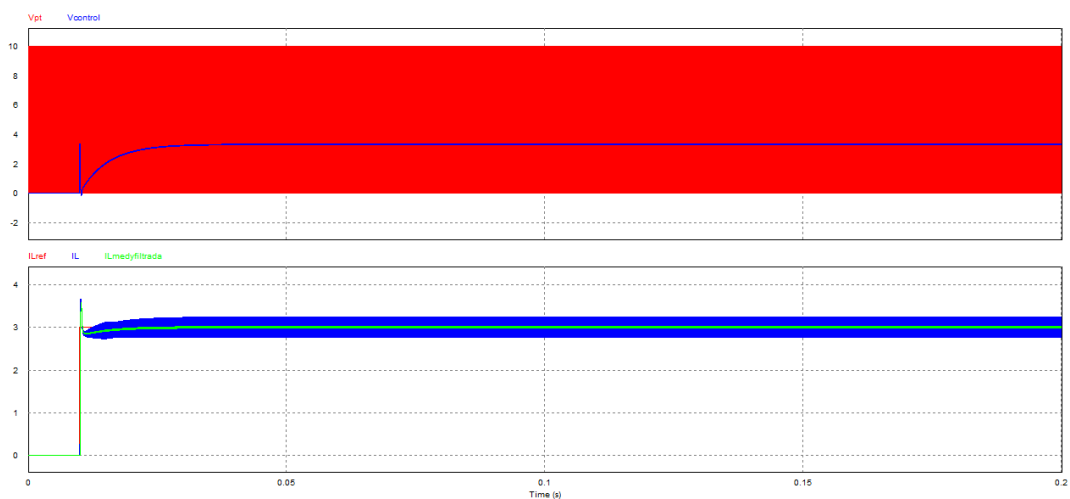


Fig 2.21 Lazo de corriente

Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión

Hagamos un zoom para ver si la corriente sigue a la referencia:

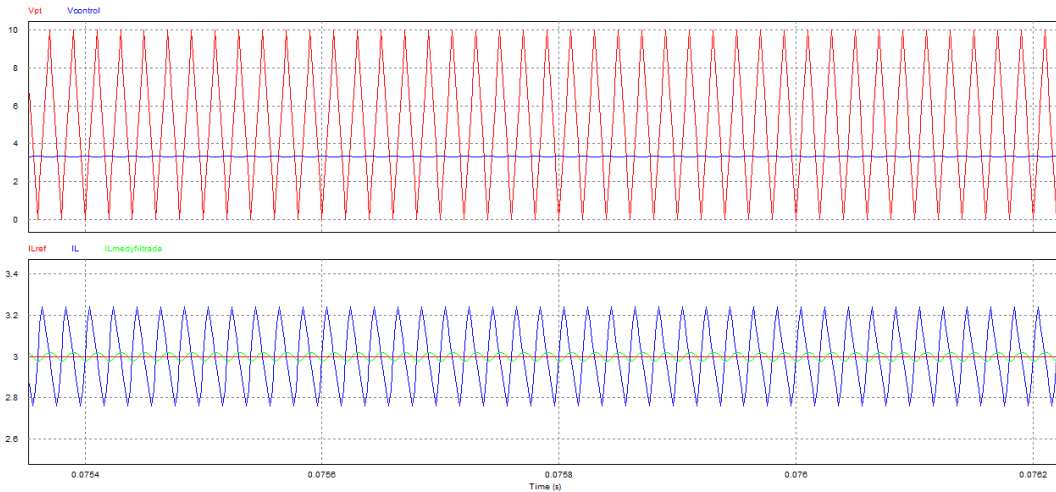


Fig 2.22 Zoom del lazo de corriente

Lazo de tensión

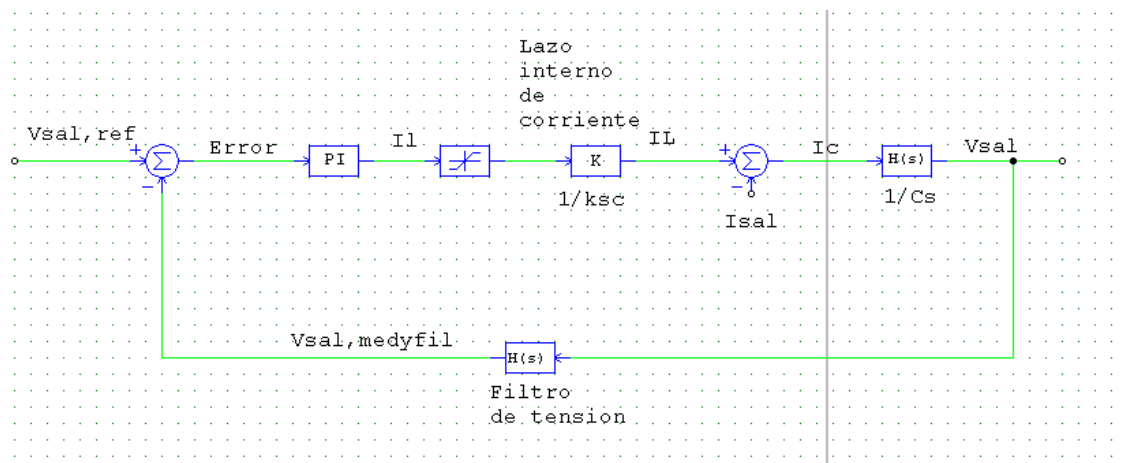


Fig 2.23 Lazo de de tensión

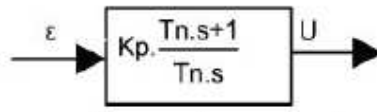
El lazo de tensión esta compuesto por:

- PI
- Lazo interno de corriente
- Condensador
- Filtro de tensión

Bloque PI

El bloque PI corresponde a un controlador proporcional integral, por lo tanto responde a la siguiente función:

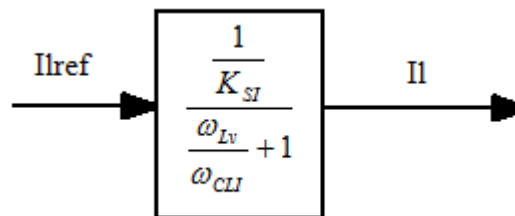
Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión



Después del bloque PI se observa el limitador, que se encargara de limitar la corriente de referencia para el lazo interno de corriente.

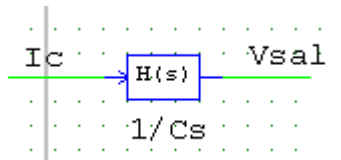
Lazo interno de corriente

El bloque del lazo interno de corriente representa al lazo interno de corriente que lleva en realidad en su interior el lazo de tensión, el lazo de corriente es mas rápido que el de tensión, su función de transferencia es la siguiente:



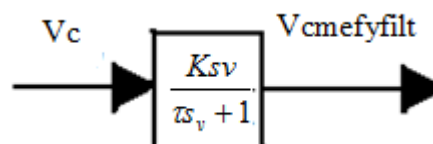
Condensador:

Convierte la tensión que pasa por el en la tensión de salida



Sensor + Filtro de tensión:

Se encarga de adecuar la señal a los niveles requeridos para que se pueda controlar en el circuito de control, básicamente lo que hace es escalar el valor de la tensión a un valor de tensión menor y adecuarlo para eliminar componentes no deseadas. Su bloque es el siguiente:



La ganancia K_{sv} lo que hace es escalar el valor máximo que puede obtener el convertidor entregando así el valor máximo de tensión en el circuito de control.

Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión

$$K_{sv} = \frac{V_{electronica}}{V_{sal}} = \frac{10}{30} = 0.333$$

Una vez obtenido la función de todos los bloques lo que hacemos es obtener la función de transferencia en lazo abierto completa de todo el sistema, que será la siguiente:

$$FT_{LA} = \frac{K_p \cdot K_{sv}}{K_{sc} \cdot C \cdot Tn} \cdot \frac{1}{s^2} \cdot (Tns + 1) \cdot \frac{1}{\omega_v + 1} \cdot \frac{1}{\frac{\omega_{lv}}{\omega_{cli}} + 1}$$

Calculo Tn:

$$-180 + MF = \arctg(Tns) - 180 - \arctg\left(\frac{s}{\omega_{cfi}}\right) - \arctg\left(\frac{\omega_{lv}}{\omega_{cli}}\right)$$

$$55 = \arctg(Tns) - \arctg\left(\frac{2\pi 500}{2\pi 5000}\right) - \arctg\left(\frac{500}{2000}\right)$$

$$55 = \arctg(Tn 2\pi 500) - \arctg\left(\frac{2\pi 500}{2\pi 5000}\right) - \arctg\left(\frac{500}{2000}\right)$$

$$55 = \arctg(Tn 2\pi 500) - 5.71 - 14.03$$

$$74.74 = \arctg(Tn 2\pi 500)$$

$$Tn = 1.673 \times 10^{-3}$$

Calculo de Kp:

$$FT_{LA} = \frac{K_p \cdot K_{sv}}{K_{sc} \cdot C \cdot Tn} \cdot \frac{1}{s^2} \cdot \sqrt{(Tns)^2 + 1} \cdot \frac{1}{\sqrt{(\omega_v)^2 + 1}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\omega_{lv}}{\omega_{cli}}\right)^2 + 1}}$$

$$1 = \frac{K_p}{3.3 \cdot 3 \cdot 1500 \times 10^{-6} \cdot 1.673 \times 10^{-3}} \cdot \frac{1}{(2\pi 500)^2} \cdot \sqrt{(1.673 \times 10^{-3} \cdot 2\pi 500)^2 + 1} \cdot \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{2\pi 500}{2\pi 5000}\right)^2 + 1}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{4}\right)^2 + 1}}$$

$$Kp = 46.55$$

Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión

Observamos la implementación mediante bloques del lazo de control completo de nuestro convertidor:

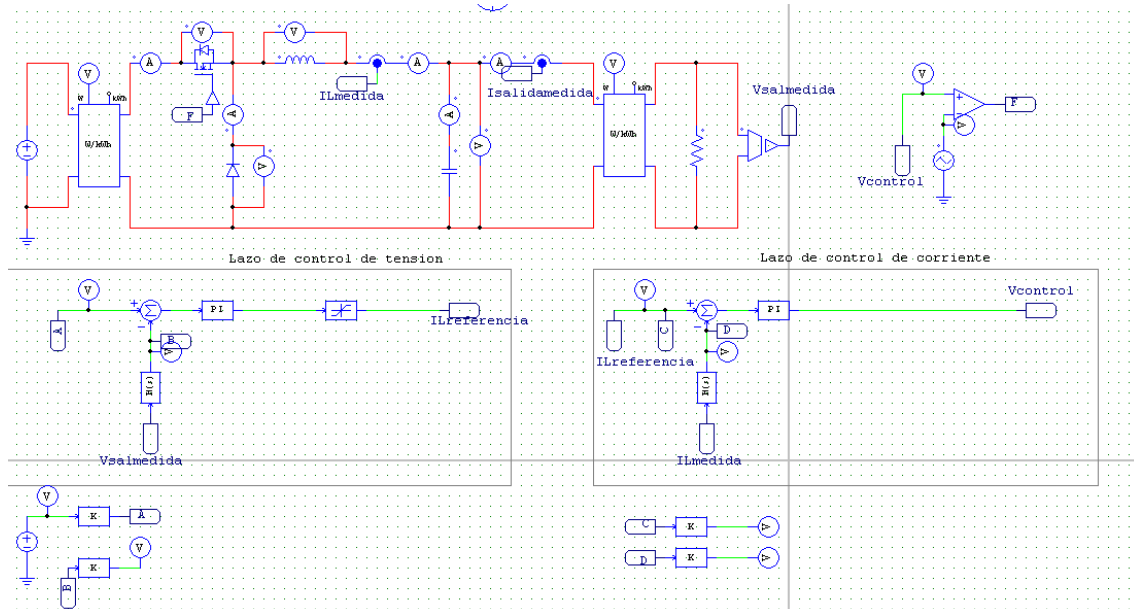
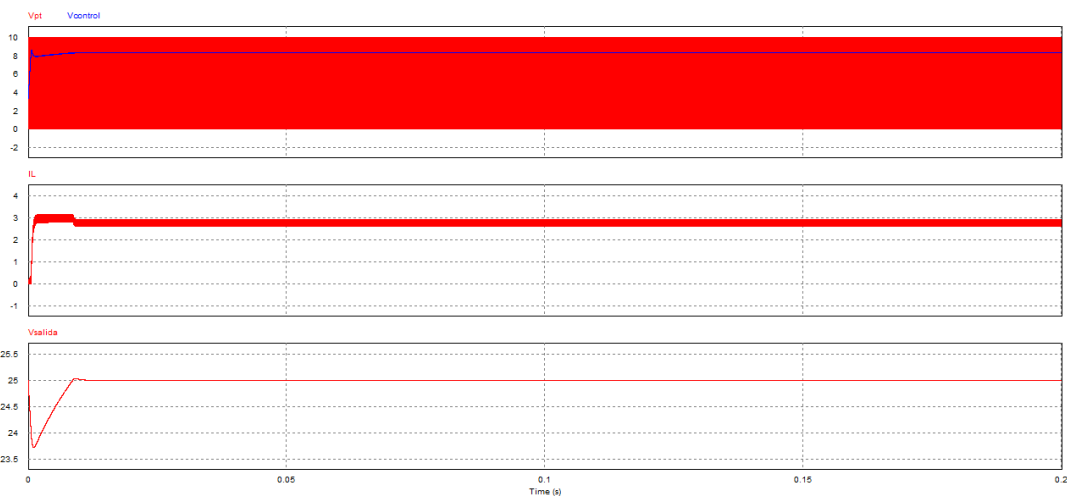


Fig 2.24 Lazo de tensión y de corriente

Veamos como funcionan los lazos de control para distintos valores de tensión de referencia:

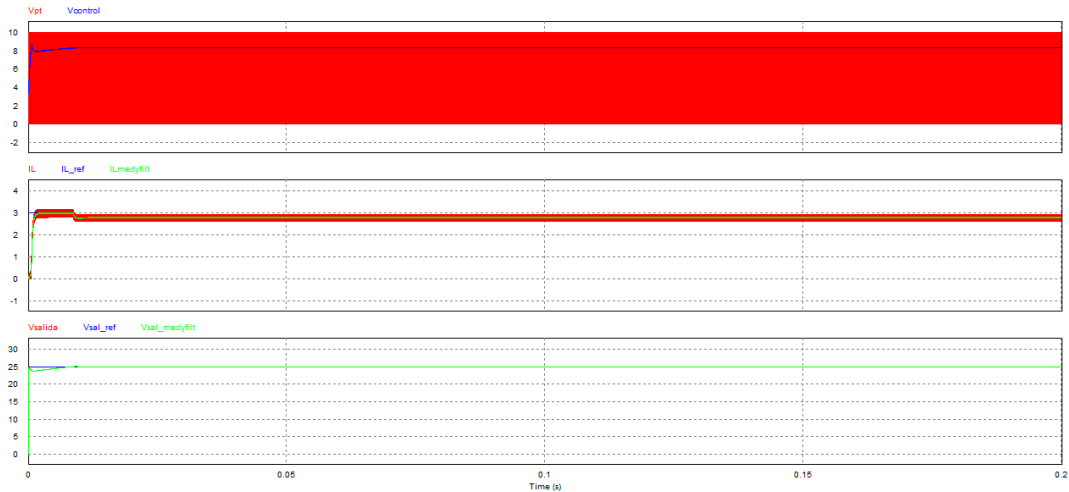
➤ $V_{sal,ref}=25V$

Introducimos a nuestro convertidor una tensión de referencia de 25V y vemos como se comporta la corriente en la inductancia y la tensión en el condensador:

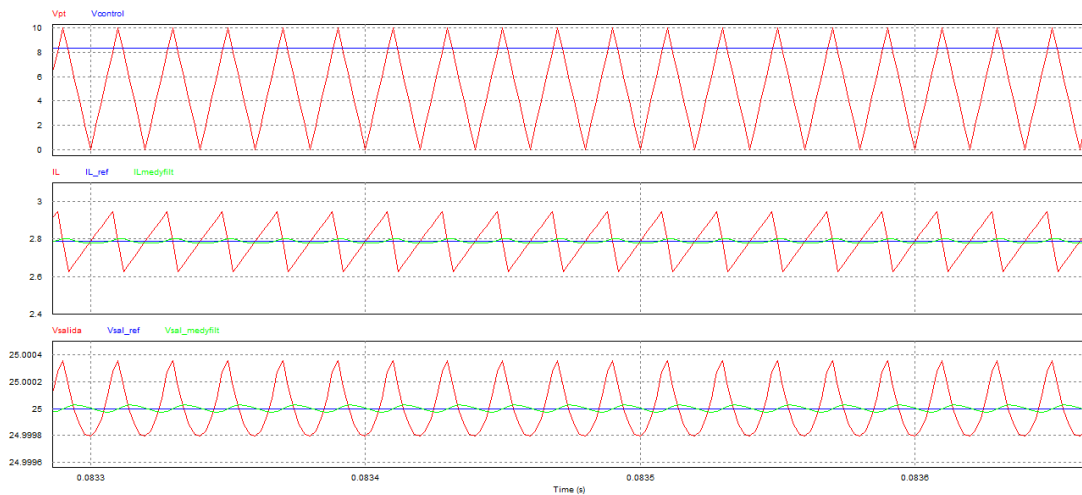


Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión

Veamos como sigue el lazo a sus referencias:



Hagamos un zoom:



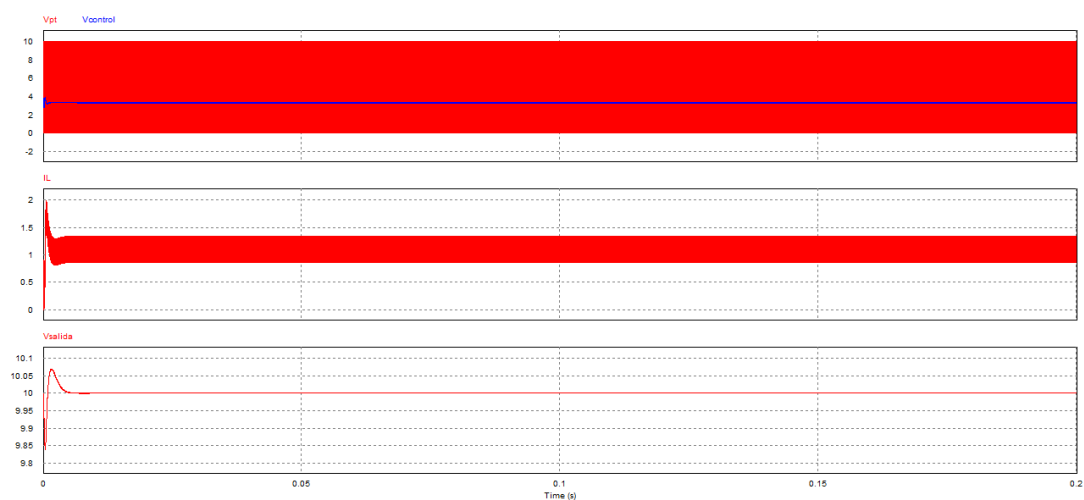
Hay que destacar que las referencias y las medidas y filtradas están escaladas en PSIM para poder compararlas con la corriente real e la inductancia y tensión en el condensador. Esto se explicara en el **último punto: explicación de los circuitos en PSIM.**

➤ $V_{sal,ref}=10V$

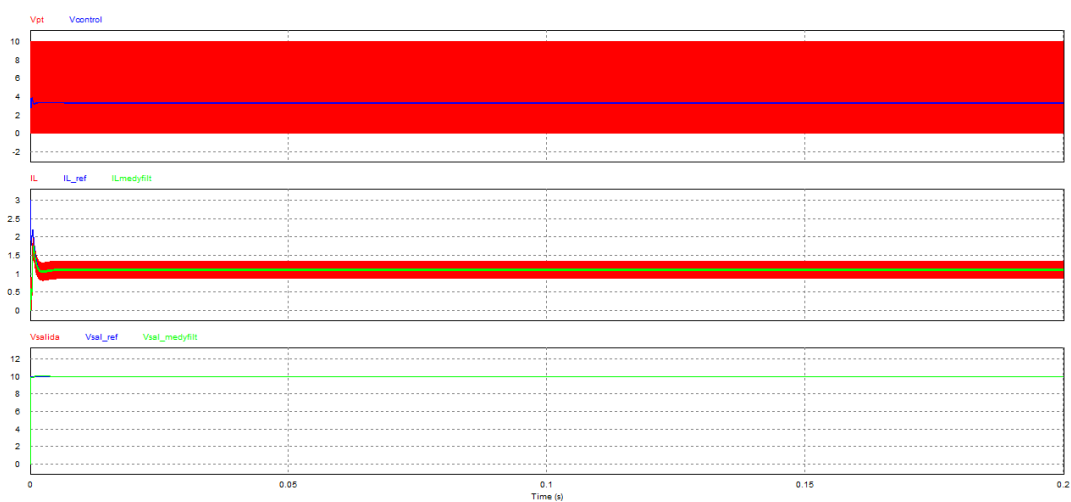
➤

Introducimos a nuestro convertidor una tensión de referencia de 10V y veamos como se comporta la corriente en la inductancia y la tensión en el condensador:

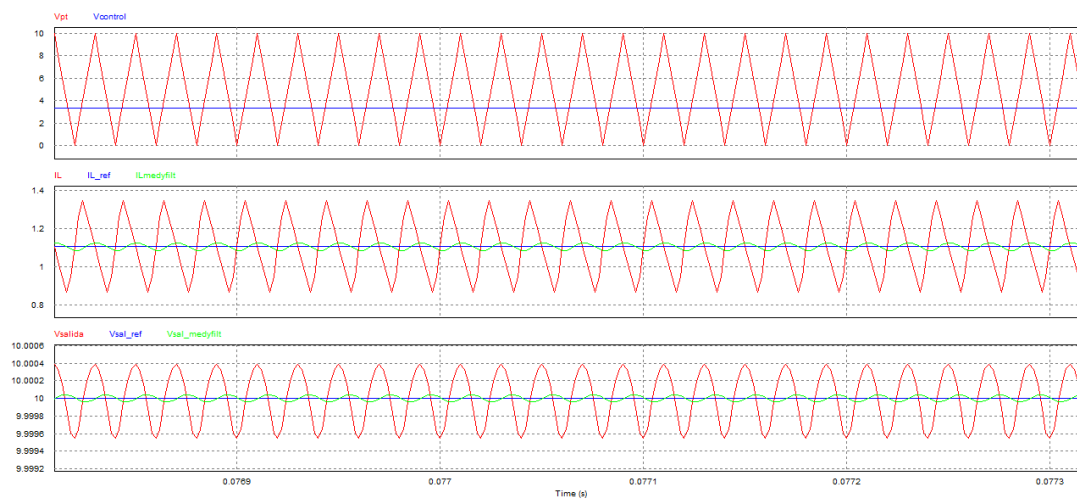
Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión



Veamos como sigue el lazo a sus referencias:



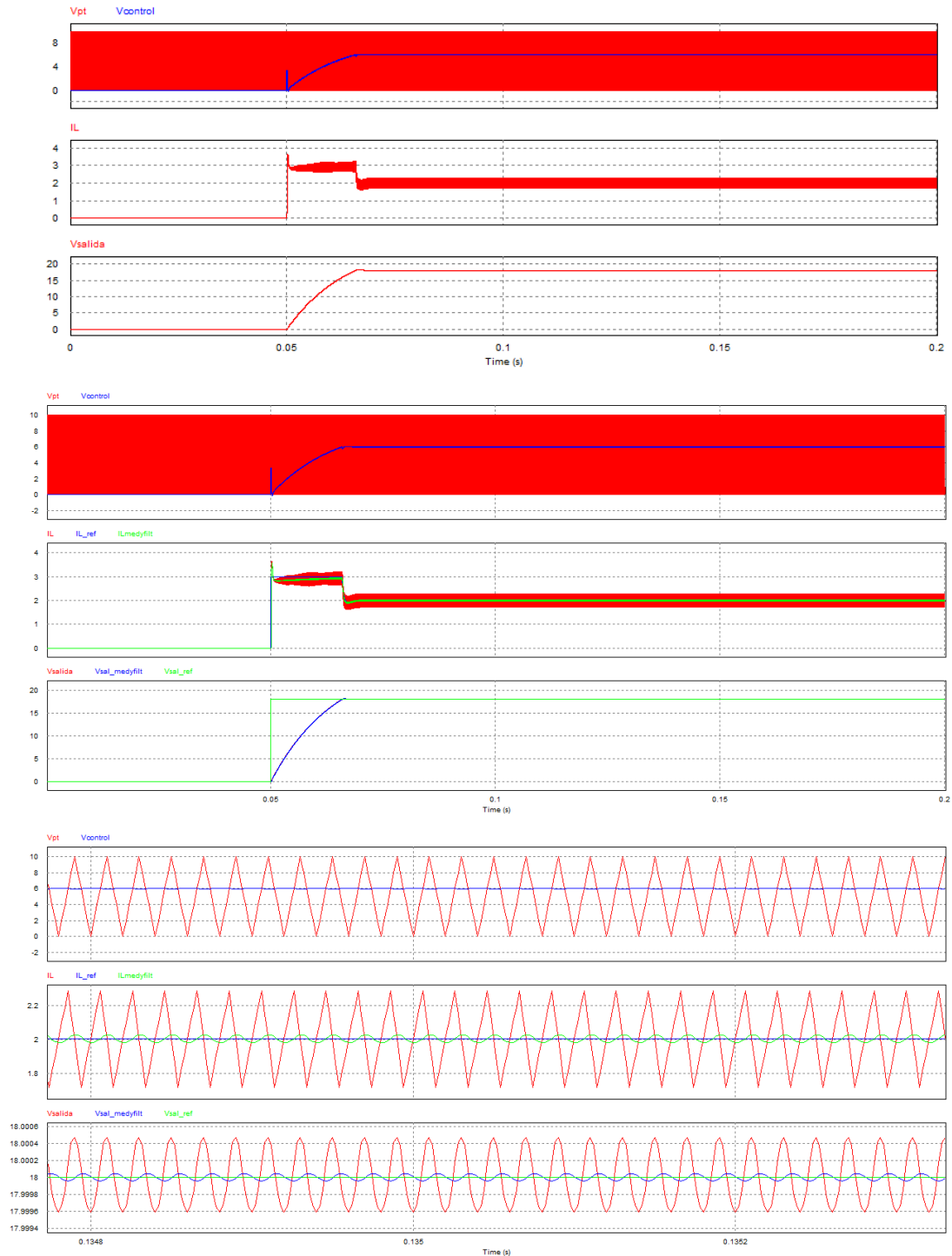
Hagamos un zoom:



Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión

➤ escalón de 0 a 18V

Introducimos a nuestro convertidor una entrada escalón y veamos como se comporta la corriente en la inductancia y la tensión en el condensador:



Vemos pues que el lazo funciona correctamente, las variables a controlar siguen a sus referencias

Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión

2.3.2 CONTROL CON RECHAZO DE PERTURBACIONES

Dentro de este apartado vamos a calcular todos los componentes necesarios para realizar el control del convertidor rechazando las perturbaciones. Primero realizaremos el control mediante los diagramas de bloques y simularemos en Psim. Una vez simulado en PSIM y viendo que funcione nos dispondremos a transformar este control por bloques a un control analógico que es el que se pretende montar en practicas.

En nuestro caso hemos establecido los siguientes valores para las frecuencias de corte:

Frecuencia filtro tensión (f_{cfv})=5000Hz

Frecuencia del filtro de corriente (f_{cfi})=2000Hz

Frecuencia del lazo de tensión (f_{lv})=5000Hz

Frecuencia del lazo de corriente (f_{li})=500Hz

El margen de fase (MF) tanto para corriente como para tensión es de 55°

Lo primero que calcularemos será el lazo de corriente y luego el lazo de tensión, puesto que ambos lazos irán en cascada. En nuestro caso hemos establecido los siguientes valores para las frecuencias de corte:

Lazo de Corriente

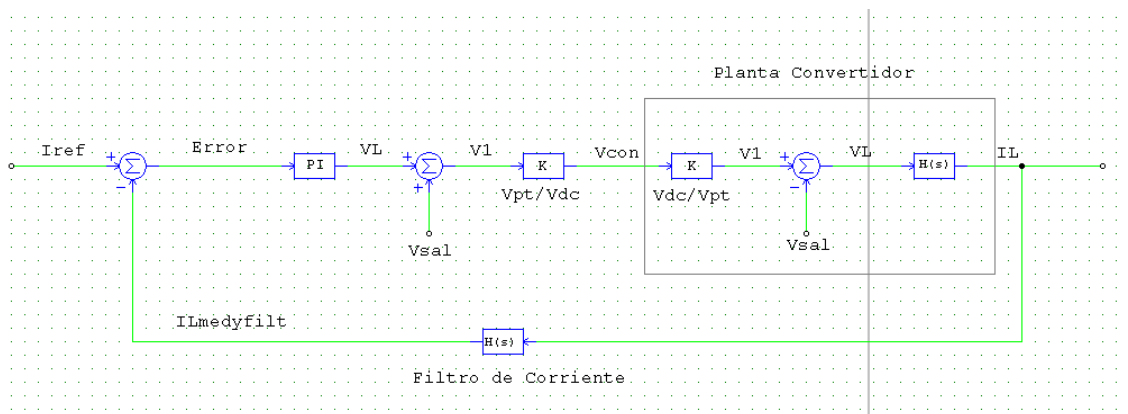


Fig 2.25 Lazo de corriente

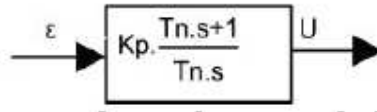
En el siguiente diagrama de bloques tenemos los siguientes Bloques:

- PI
- Bloque V_{pt}/V_{dc}
- Planta (célula + Inductancia)
- Sensor + Filtro

Bloque PI

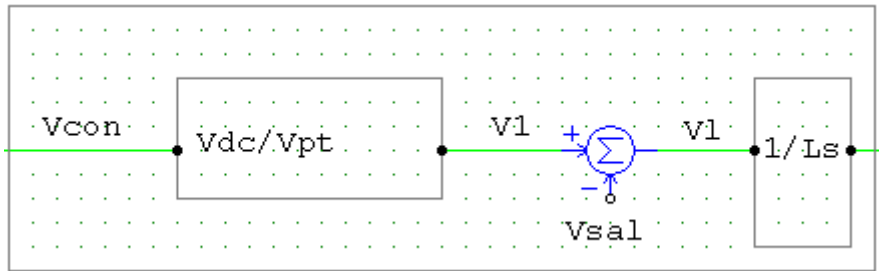
El bloque PI corresponde a un controlador proporcional integral, por lo tanto responde a la siguiente función:

Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión



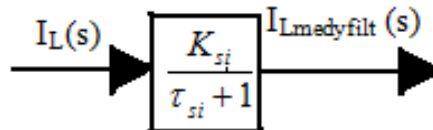
Planta

La planta nos muestra el funcionamiento del convertidor como ya se explico anteriormente en el apartado 1. Nos da el siguiente bloque:



Sensor +Filtro

Se encarga de adecuar la señal a los niveles requeridos para que se pueda controlar en el circuito de control, básicamente lo que hace es escalar el valor de la corriente a un valor de tensión y adecuarlo para eliminar componentes no deseadas. Su bloque es el siguiente:



Ksi esta escalada, la corriente nominal que va a pasar por nuestra inductancia es de 3ª y la tensión máxima a la que vamos a trabajar con los parámetros de electrónica es a 10 V.

Por lo tanto $K_{si} = \frac{10V}{3A} = 3.333$

Bloque Vpt/Vdc

Este bloque se obtiene como resultado de intentar evitar la perturbación en nuestro lazo de control, es únicamente una ganancia con valor Vpt/Vdc.

Una vez obtenido la función de todos los bloques lo que hacemos es obtener la función de transferencia en lazo abierto completa de todo el sistema, que será la siguiente:

$$FT_{LA} = \frac{K_p \cdot K_{SI} \cdot V_{DC} \cdot V_{PT}}{V_{PT} \cdot L \cdot T_n \cdot V_{DC}} \cdot \frac{1}{s^2} \cdot (T_n s + 1) \cdot \frac{1}{\tau_{SI} + 1}$$

Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión

$$FT_{LA} = \frac{K_P \cdot K_{SI}}{L \cdot Tn} \cdot \frac{1}{s^2} \cdot (Tns + 1) \cdot \frac{1}{\tau_{SI} + 1}$$

Calculo Tn:

$$-180 + MF = \arctg(Tns) - 180 - \arctg\left(\frac{s}{\omega_{cfi}}\right)$$

$$55 = \arctg(Tn2\pi2000) - \arctg\left(\frac{2\pi2000}{2\pi5000}\right)$$

$$55 = \arctg(Tn2\pi2000) - 21.80$$

$$76.80 = \arctg(Tn2\pi2000)$$

$$\tan(76.80) = Tn2\pi2000$$

$$Tn = 3.39 \times 10^{-4}$$

Calculo de Kp:

$$FT_{LA} = \frac{K_P \cdot K_{SI}}{L \cdot Tn} \cdot \frac{1}{\omega_{Li}^2} \cdot \sqrt{\frac{(Tns)^2 + 1}{(\tau_{SI})^2 + 1}}$$

$$1 = \frac{K_P \cdot 3.3}{0.25 \times 10^{-3} \cdot 3.39 \times 10^{-4}} \cdot \frac{1}{(2\pi2000)^2} \cdot \sqrt{\frac{(3.39 \times 10^{-4} \cdot 2\pi2000)^2 + 1}{\left(\frac{2000}{5000}\right)^2 + 1}}$$

$$Kp = 0.99819$$

Observamos la implementación del bloque de corriente mediante bloques:

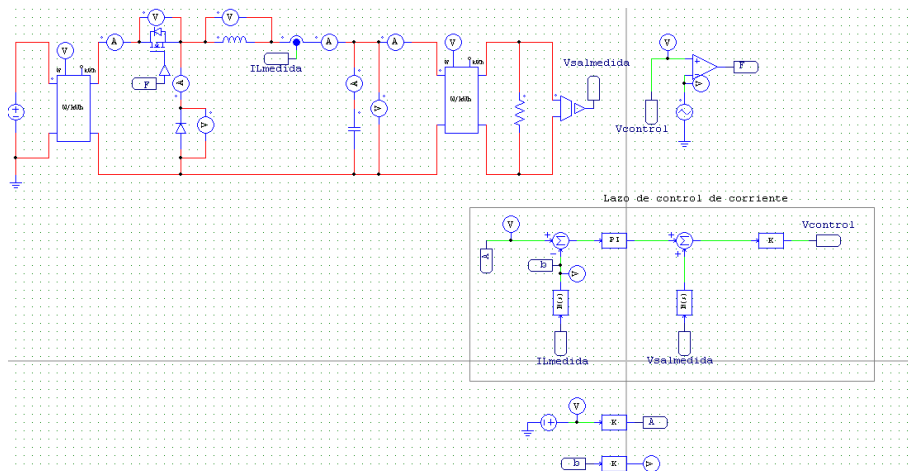


Fig 2.26 Lazo de corriente

Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión

Veamos su funcionamiento

Introducimos un escalón de corriente de 0 a 3A y veamos la respuesta del sistema frente al escalón:

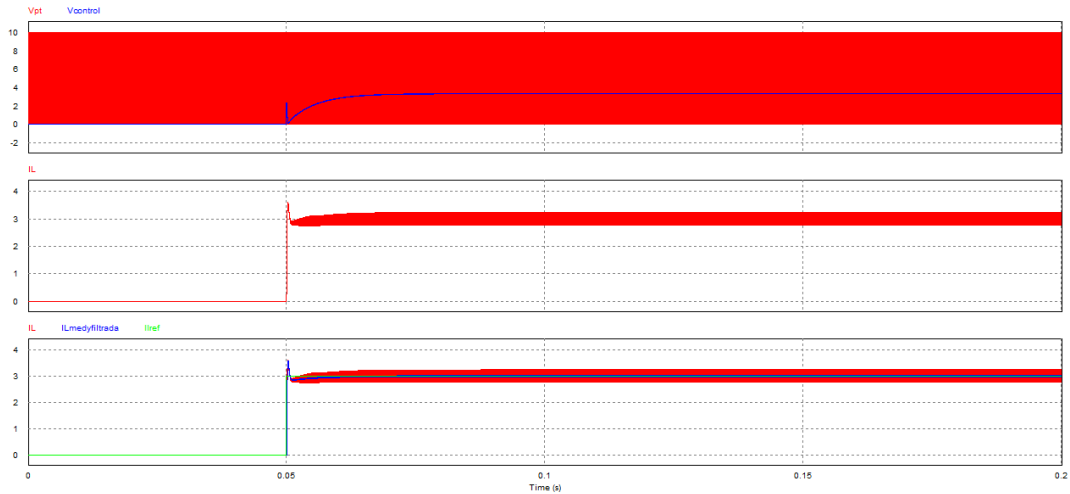


Fig 2.27 Lazo de corriente

Hagamos un zoom para ver si la corriente sigue a la referencia:

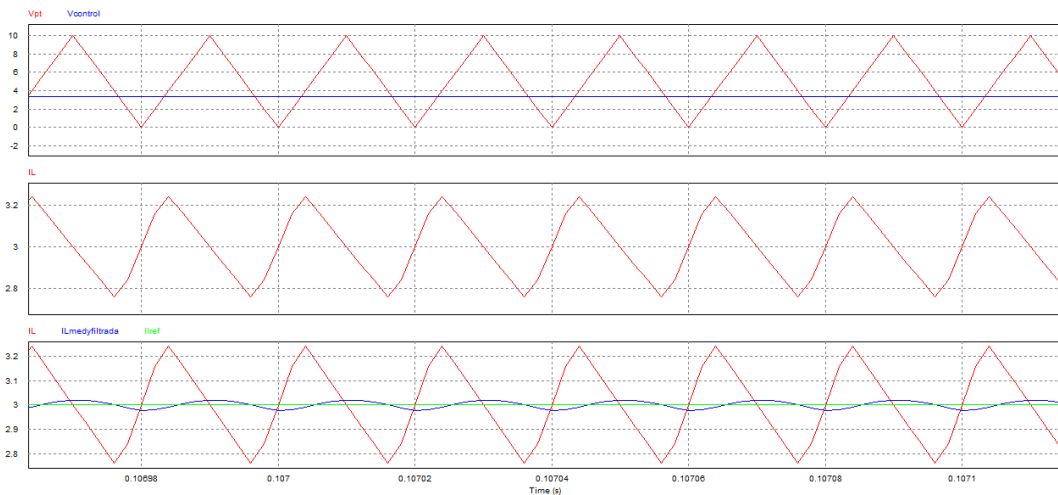


Fig 2.28 Zoom del lazo de corriente

Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión

Lazo de tensión

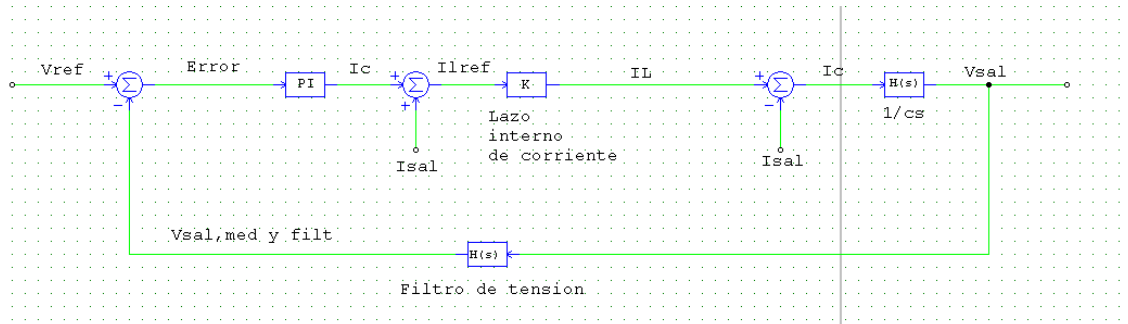


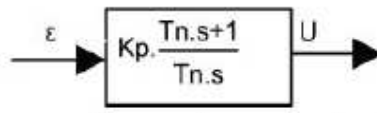
Fig 2.29 Lazo de de tensión

El lazo de tensión esta compuesto por:

- PI
- Lazo interno de corriente
- Condensador
- Filtro de tensión

Bloque PI

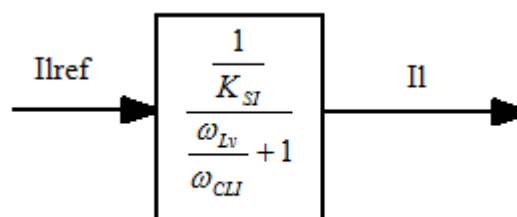
El bloque PI corresponde a un controlador proporcional integral, por lo tanto responde a la siguiente función:



Después del bloque PI se observa el limitador, que se encargara de limitar la corriente de referencia para el lazo interno de corriente.

Lazo interno de corriente

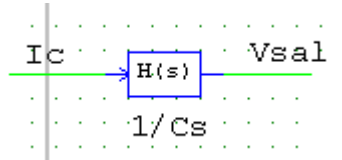
El bloque del lazo interno de corriente representa al lazo interno de corriente que lleva en realidad en su interior el lazo de tensión, el lazo de corriente es mas rápido que el de tensión, su función de transferencia es la siguiente:



Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión

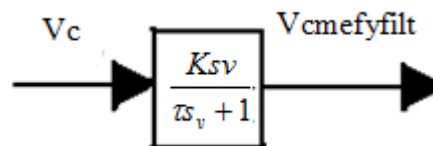
Condensador:

Convierte la tensión que pasa por el en la tensión de salida



Sensor + Filtro de tensión:

Se encarga de adecuar la señal a los niveles requeridos para que se pueda controlar en el circuito de control, básicamente lo que hace es escalar el valor de la tensión a un valor de tensión menor y adecuarlo para eliminar componentes no deseadas. Su bloque es el siguiente:



La ganancia Ksv lo que hace es escalar el valor máximo que puede obtener el convertidor entregando así el valor máximo de tensión en el circuito de control.

$$K_{sv} = \frac{V_{electronica}}{V_{sal}} = \frac{10}{30} = 0.333$$

Una vez obtenido la función de todos los bloques lo que hacemos es obtener la función de transferencia en lazo abierto completa de todo el sistema, que será la siguiente:

$$FT_{LA} = \frac{K_p \cdot K_{sv}}{K_{sc} \cdot C \cdot Tn} \cdot \frac{1}{s^2} \cdot (Tns + 1) \cdot \frac{1}{Ts_v + 1} \cdot \frac{1}{\frac{\omega_{lv}}{\omega_{cli}} + 1}$$

Calculo Tn:

$$-180 + MF = \arctg(Tns) - 180 - \arctg\left(\frac{s}{\omega_{cfi}}\right) - \arctg\left(\frac{\omega_{lv}}{\omega_{cli}}\right)$$

$$55 = \arctg(Tns) - \arctg\left(\frac{2\pi 500}{2\pi 5000}\right) - \arctg\left(\frac{500}{2000}\right)$$

$$55 = \arctg(Tn 2\pi 500) - \arctg\left(\frac{2\pi 500}{2\pi 5000}\right) - \arctg\left(\frac{500}{2000}\right)$$

$$55 = \arctg(Tn 2\pi 500) - 5.71 - 14.03$$

$$74.74 = \arctg(Tn 2\pi 500)$$

$$Tn = 1.673 \times 10^{-3}$$

Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión

Calculo de Kp:

$$FT_{LA} = \frac{K_p \cdot K_{sv}}{K_{sc} \cdot C \cdot Tn} \cdot \frac{1}{s^2} \cdot \sqrt{(Tns)^2 + 1} \cdot \frac{1}{\sqrt{(\omega_v)^2 + 1}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\omega_{lv}}{\omega_{cli}}\right)^2 + 1}}$$

$$1 = \frac{K_p}{3.3 \cdot 3 \cdot 1500 \times 10^{-6} \cdot 1.673 \times 10^{-3}} \cdot \frac{1}{(2\pi 500)^2} \cdot \sqrt{(1.673 \times 10^{-3} \cdot 2\pi 500)^2 + 1} \cdot \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{2\pi 500}{2\pi 5000}\right)^2 + 1}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{4}\right)^2 + 1}}$$

$$K_p = 46.55$$

Observamos la implementación mediante bloques del lazo de control completo de nuestro convertidor:

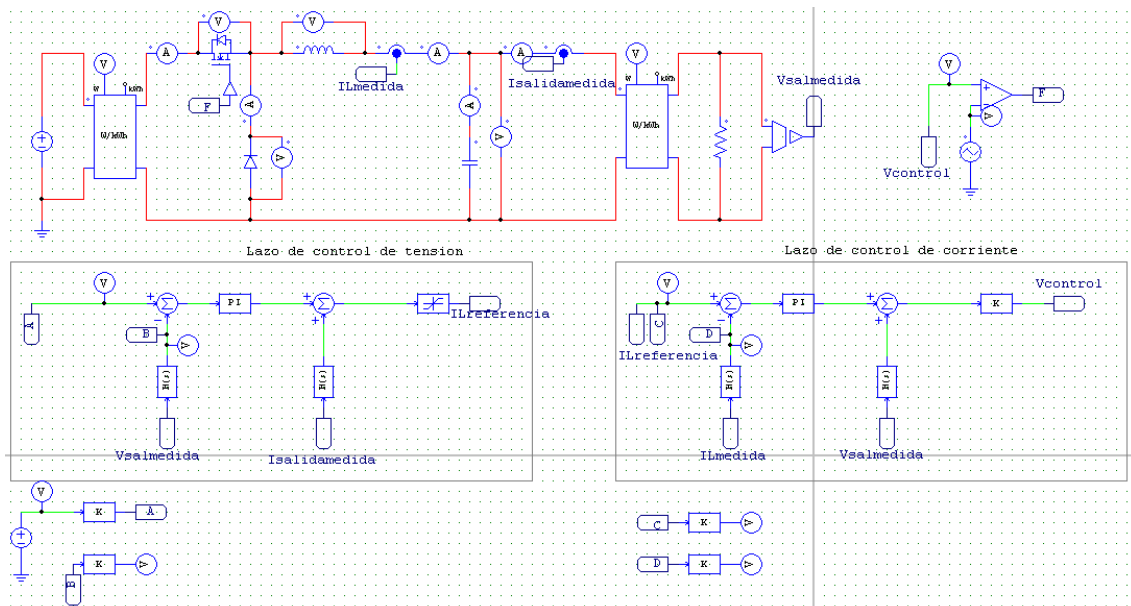


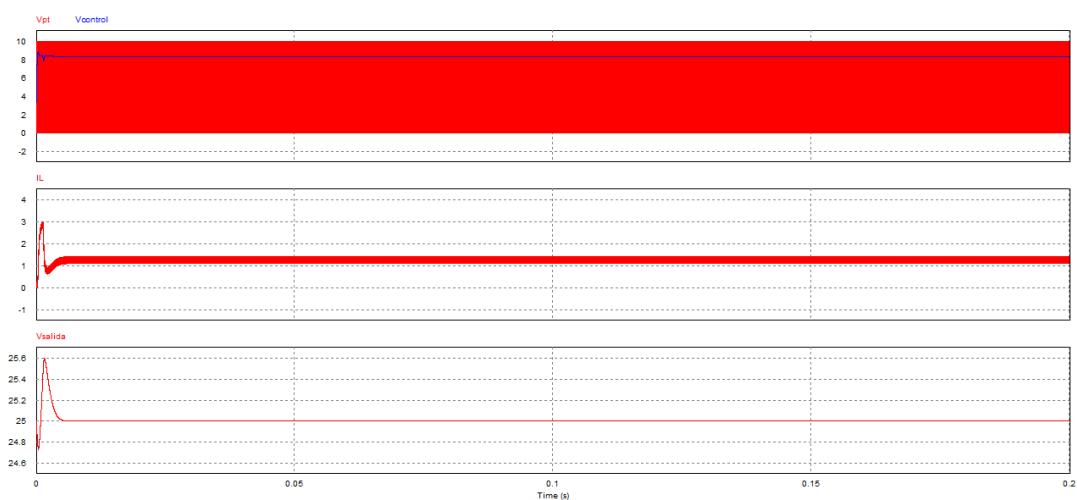
Fig 2.30 Lazo de tensión y de corriente

Veamos como funcionan los lazos de control para distintos valores de tensión de referencia:

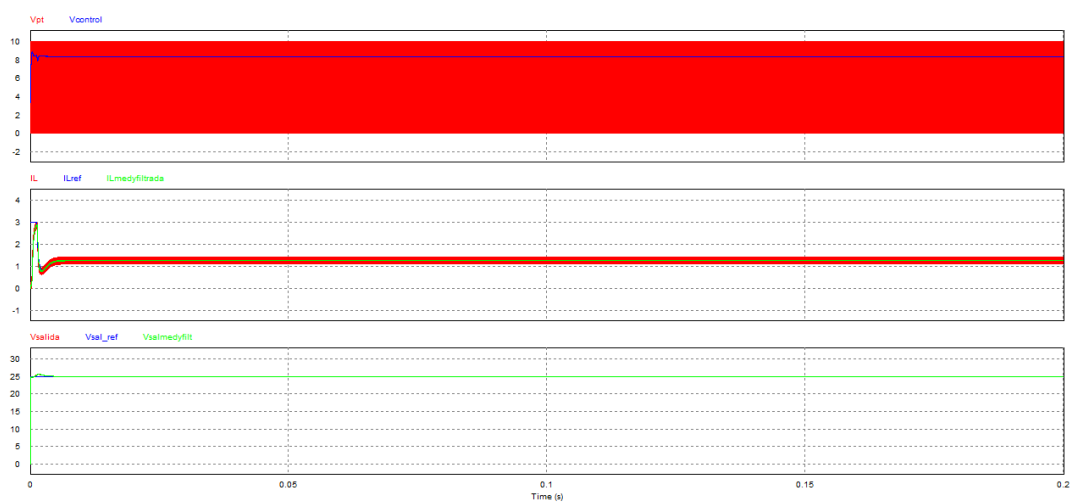
➤ $V_{sal,ref}=25V$

Introducimos a nuestro convertidor una tensión de referencia de 25V y veamos como se comporta la corriente en la inductancia y la tensión en el condensador:

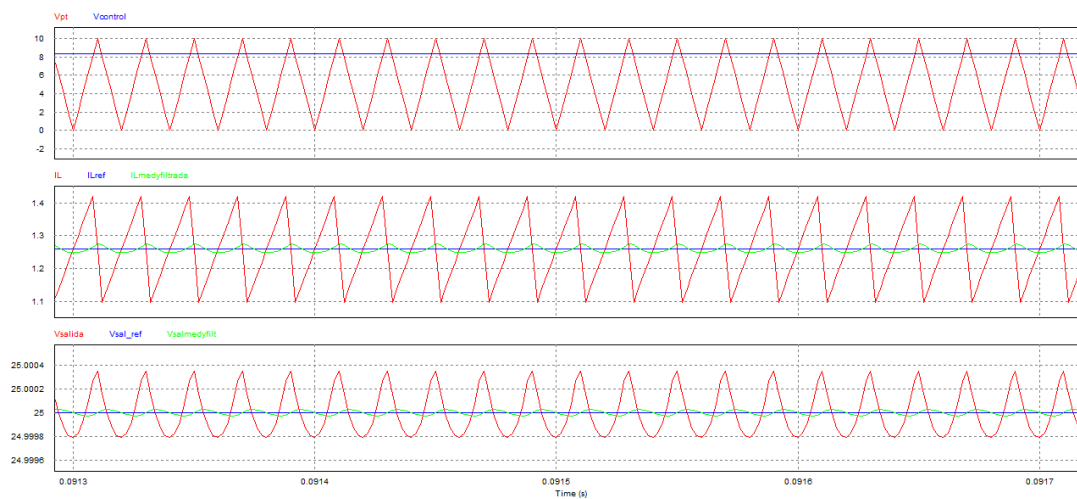
Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión



Veamos como sigue el lazo a sus referencias:



Hagamos un zoom:

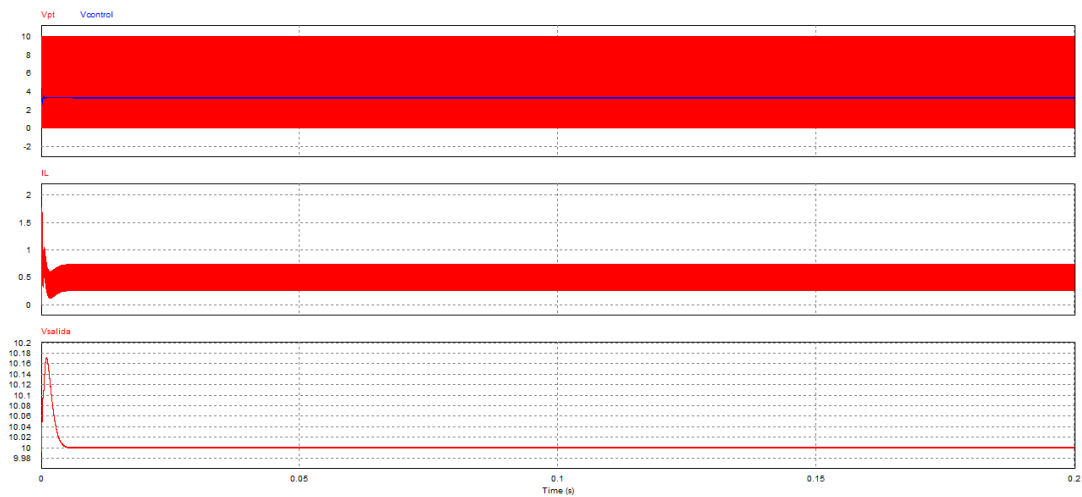


Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión

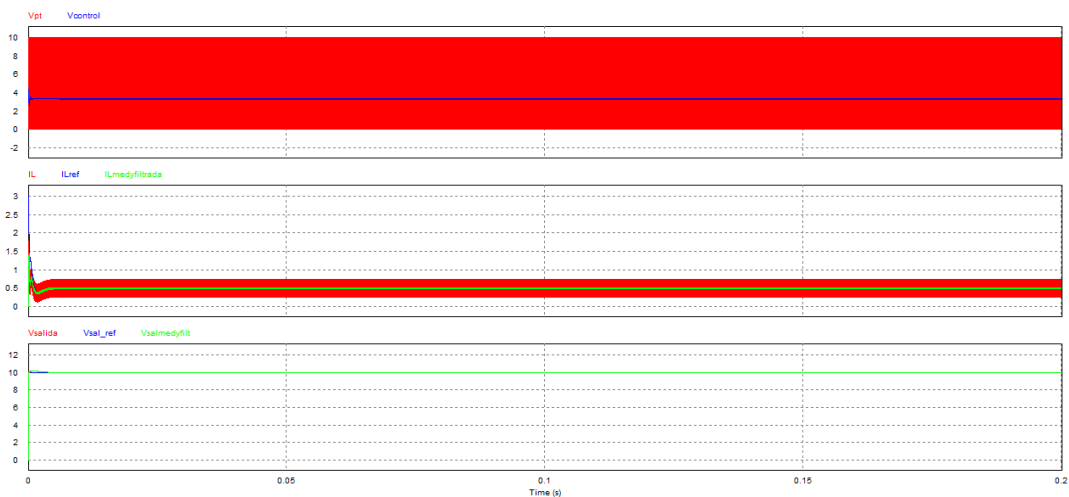
Hay que destacar que las referencias y las medidas y filtradas están escaladas en PSIM para poder compararlas con la corriente real e la inductancia y tensión en el condensador. Esto se explicara en el **último punto: explicación de los circuitos en PSIM.**

➤ $V_{sal,ref}=10V$

Introducimos a nuestro convertidor una tensión de referencia de 10V y veamos como se comporta la corriente en la inductancia y la tensión en el condensador:

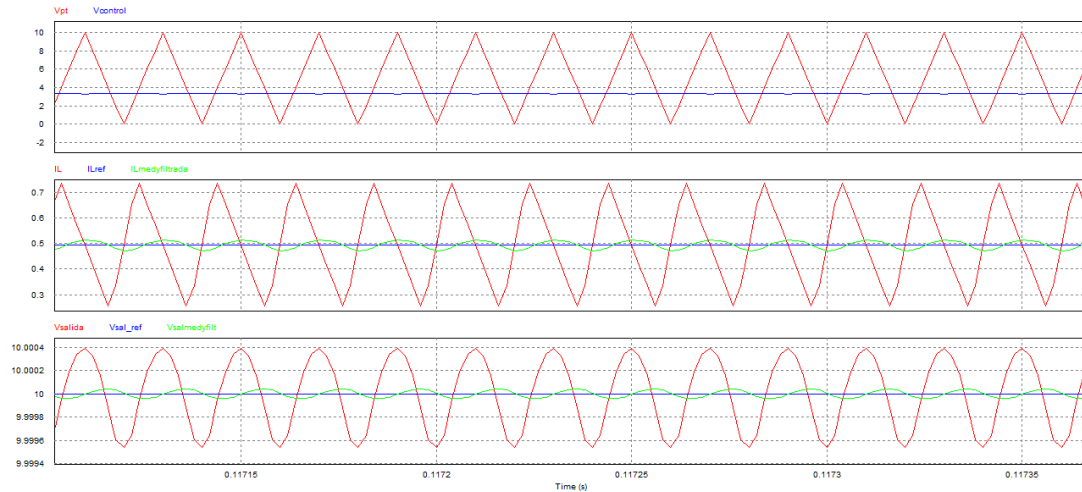


Veamos como sigue el lazo a sus referencias:



Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión

Hagamos un zoom:



2.3.3 CONTROL CON RECHAZO DE PERTURBACIONES ANALOGICO

Una vez obtenido el circuito completo con sus respectivos controles, tanto el de corriente como el de tensión representados con bloques, nos dispondremos a convertir este circuito a un circuito analógico que será el que implementemos en la placa.

Veamos pues el circuito a transformar:

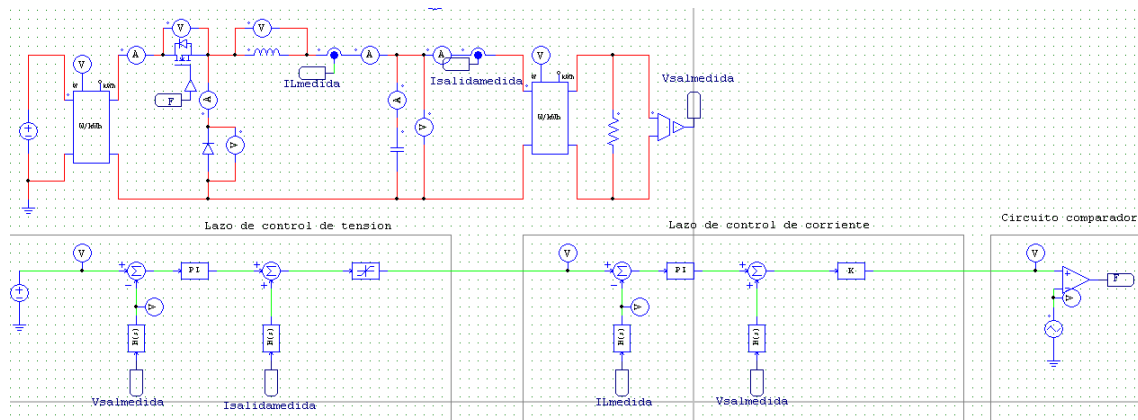


Fig 2.31 Circuito completo con bloques

Empezaremos primero por los elementos de la planta del convertidor y poco a poco nos iremos metiendo en los elementos de control.

ELEMENTOS DE LA PLANTA:

Tanto el Mosfet como el diodo habrá que dimensionarlos para que soporten la tensión que van a ver, como la corriente que circula por ellos.

Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión

Diodo:

Hemos escogido el diodo Mbr 1060, que soporta tensiones de hasta 60V y corrientes de hasta 10A. Pues bien la tensión máxima que soportara el Diodo es de 30V pero teniendo en cuenta los picos de tensión en el transitorio se sobredimensiona hasta 60V.

Mosfet:

Hemos escogido el Mosfet N,60V,10A,TO-220, que soporta tensiones de hasta 60V y corrientes de hasta 10A. Pues bien la tensión máxima que soportara el Mosfet es de 30V pero teniendo en cuenta los picos de tensión en el transitorio se sobredimensiona hasta 60V.

Condensador:

El condensador escogido es un condensador electrolítico de 1500 μF

Inductancia:

La inductancia obtenida en los cálculos es de 0,25mH pero no la compraremos entera sino que la bobinaremos nosotros.

Los datos que tenemos son:

- Densidad de corriente eléctrica: $J=5\text{A/mm}^2$
- Campo magnético: $B=0,3\text{T}$
- Corriente máxima por la inductancia: $I_{\text{max}}=3\text{A}$
- Área entrehierro $a=2\text{mm}^2$
- Valor de la inductancia: $L=0,25\text{mH}$
- Permeabilidad de vacío: $\mu_o = 4\pi 10^{-7}$

Calculamos el Producto Área (PA)

$$PA \geq \frac{\alpha \cdot I_{\text{max}}^2 \cdot L}{J \cdot B_{\text{max}}} = \frac{2 \cdot 3^2 \text{ A} \cdot 0,25 \times 10^{-3} \text{ H}}{5 \text{ A/mm}^2 \cdot 0,2 \text{ T}} = 3000 \text{ mm}^4$$

Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión

El carrete elegido para la inductancia es el RM10, con las siguientes características:

CORE SETS

Effective core parameters

| SYMBOL | PARAMETER | VALUE | UNIT |
|---------------|------------------|-------|------------------|
| $\Sigma(l/A)$ | core factor (C1) | 0.462 | mm^{-1} |
| V_e | effective volume | 4310 | mm^3 |
| l_e | effective length | 44.6 | mm |
| A_e | effective area | 96.6 | mm^2 |
| A_{\min} | minimum area | 89.1 | mm^2 |
| m | mass of set | = 22 | g |

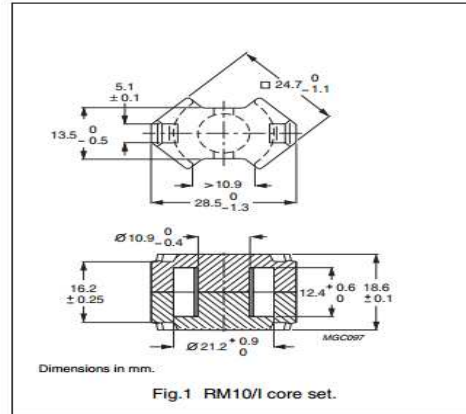


Fig 2.32 Características RM10

De las hojas de características del nucleo RM10 obtenemos:

- A_e (Área efectiva)= 96.6mm^2
- A_w (Área de ventana)= 63.86mm^2
- L_e (longitud efectiva)= 44.6mm
- PA (Producto área) $_{\min}=A_{\min} \times A_w=89.1 \times 63.86=5689,926 > 3000\text{mm}^4$
- PA (Producto área) $_{\max}=A_e \times A_w=96.6 \times 63.86=6168,876 > 3000\text{mm}^4$

Numero de Espiras:

$$N = \frac{L \cdot I_{\max}}{A_e \cdot B_{\max}} = \frac{0.25 \times 10^{-3} \cdot 3}{96.6 \times 10^{-6} \cdot 0.3} = 25.87 \approx 26 \text{ vueltas}$$

Reluctancia:

$$N = \frac{N^2}{L} = \frac{26^2}{0.25 \times 10^{-3}} = 2704000 \text{ Av / Wb}$$

Entrehierro:

$$La = \mu_0 \cdot \Re \cdot A = 4\pi \times 10^{-7} \cdot 2704000 \cdot 96.6 = 0.32 \text{ mm}$$

Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión

ELEMENTOS DE CONTROL:

Sensor y Filtro de corriente:

El circuito del sensor de corriente va a ser una célula Lem, Concretamente la célula Lem LA25-NP.

Este sensor lo que hace es escalar el valor de la corriente a un valor inferior y las relaciones de transformación las tenemos en la siguiente tabla que se encuentra en las hojas de características:

| Number of primary turns | Primary current | | Nominal output current I_{SN} [mA] | Turns ratio K_N | Primary resistance R_p [mΩ] | Primary insertion inductance L_p [μH] | Recommended connections |
|-------------------------|-------------------------|----------------------|---|----------------------|----------------------------------|--|-------------------------|
| | nominal I_{PN} [A] | maximum I_p [A] | | | | | |
| 1 | 25 | 36 | 25 | 1/1000 | 0.3 | 0.023 | |
| 2 | 12 | 18 | 24 | 2/1000 | 1.1 | 0.09 | |
| 3 | 8 | 12 | 24 | 3/1000 | 2.5 | 0.21 | |
| 4 | 6 | 9 | 24 | 4/1000 | 4.4 | 0.37 | |
| 5 | 5 | 7 | 25 | 5/1000 | 6.3 | 0.58 | |

Fig 2.33 Relación de espiras para célula LEM

Nuestra corriente nominal por la inductancia va a ser de 3A, por lo que escogeremos la relación de espiras 5/1000.

La célula lem debe llevar una resistencia a la salida para convertir la corriente escalada a un valor de tensión escalado, ya que los circuitos de control trabajan con tensiones. Las hojas de características nos indican que debemos colocar una resistencia entre 100Ω y 320Ω. Escogemos una de 316Ω que también nos servirá para el filtro paso. Pues bien:

$$I_{escalada} = I_L \cdot \frac{N_1}{N_2} = 3A \cdot \frac{1}{5} = 0.015A$$

$$V_{escalada} = I_{escalada} \cdot R_{Filtro} = 0.015A \cdot 316\Omega = 4.74V$$

Como esos 4,74V no alcanzan los 10V impuestos para la referencia de corriente máxima habrá que elevar la tensión con un amplificador.

Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión

Pues bien el circuito resultante de nuestro sensor y filtro de corriente será el siguiente:

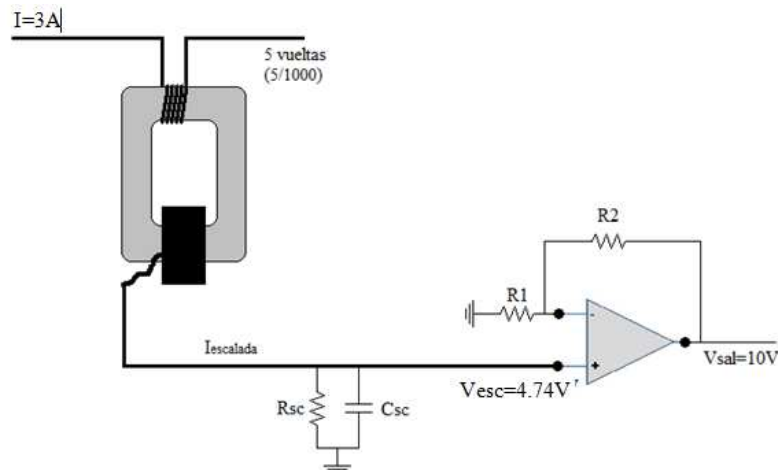


Fig 2.34 Sensor de corriente + Filtro analógico

Calculamos el filtro:

$$\omega_{\text{filtro}} = \frac{1}{R_{\text{Filtro}} \cdot C_{\text{Filtro}}} \Rightarrow C_{\text{Filtro}} = \frac{1}{316 \cdot 2\pi \cdot 5000} = 100.73\text{nF} \approx 100\text{nF}$$

Tenemos un filtro de corriente formado por

- $R_{\text{Filtro}} = 316\Omega$
- $C_{\text{Filtro}} = 100\text{nF}$

Calculamos ahora el circuito amplificador:

Según la teoría de electrónica la ecuación de un amplificador es

$$V_{\text{sal}} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_{\text{ent}} \Rightarrow \frac{R_2}{R_1} = 1.10 \Rightarrow R_2 = 1.10R_1$$

$$R_1 = 10\text{K}\Omega$$

$$R_2 = 11\text{K}\Omega$$

$$K_{\text{sc}} = 10\text{V}/3\text{A} = 3.333$$

El amplificador operacional a utilizar será el TL07acp

Sensor y Filtro de tensión:

El sensor de tensión que vamos a utilizar va a ser un simple divisor de tensión, utilizaremos la resistencia de medida como resistencia de filtro. El filtro a implementar será al igual que el de corriente un filtro RC

Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión

El circuito a implementar es el siguiente:

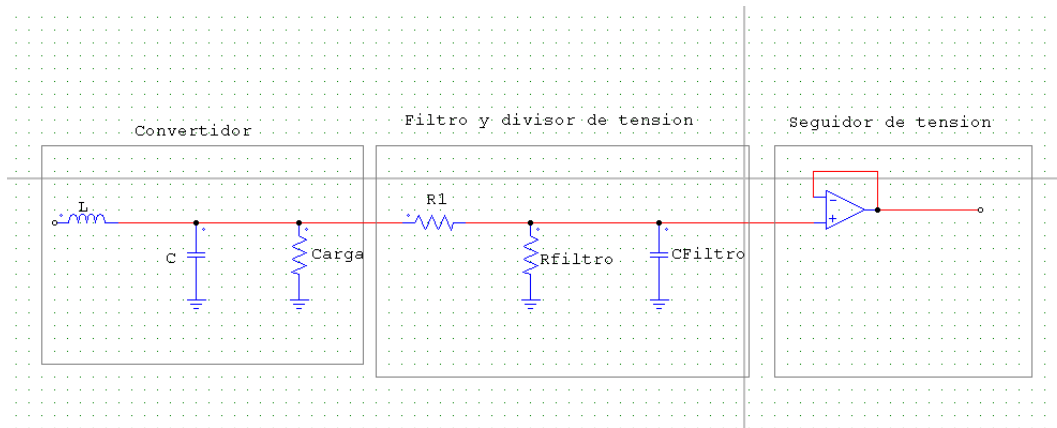


Fig 2.35 Sensor de tensión + Filtro analógico

El valor impuesto para la máxima tensión de salida que será 30V es de 10V

$$K_{sv} = 1/3$$

$$V_{R_{filtro}} = \frac{R_{Filtro}}{R_{Filtro} + R1} \cdot V_{Carga} \Rightarrow 10 = \frac{R_{Filtro}}{R_{Filtro} + R1} \cdot 30V \Rightarrow 10R_{Filtro} + 10R = 30R_{Filtro}$$

$$R1 = 2R_{Filtro}$$

$$R_{Filtro} = 15K\Omega \Rightarrow R1 = 30K\Omega$$

Calculo del filtro:

$$\omega_{c_{filtro}} = \frac{1}{R_{Filtro} \cdot C_{Filtro}} \Rightarrow C_{Filtro} = \frac{1}{15000 \cdot 2\pi \cdot 5000} = 2.12nF \approx 2.7nF$$

Tenemos un filtro de corriente formado por

- $R_{Filtro} = 15k\Omega$
- $C_{Filtro} = 2.7nF$

El amplificador operacional a utilizar será el TL07acp

PI Corriente:

Implementamos en PI de corriente a partir de los valores obtenidos en el apartado 2.3.2

$$Tn = 3.39 \times 10^{-4}$$

$$Kp = 0.99819$$

Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión

El circuito analógico del PI es el que se muestra en la figura 2.36

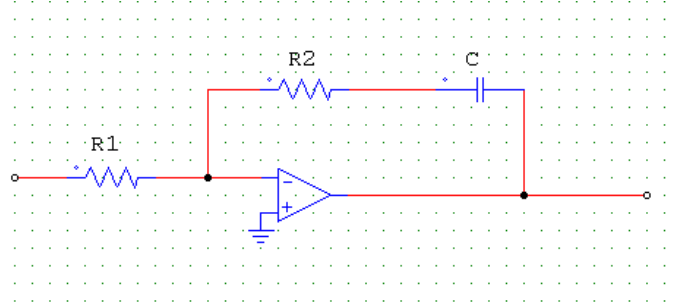


Fig 2.36 PI corriente analógico

Nos disponemos a calcular los componentes del PI mediante las siguientes formulas:

$$K_p = \frac{R_2}{R_1} \rightarrow \text{Pues bien establecemos que } R_1 = 3,3k\Omega$$

$$T_n = C \cdot R_2$$

$$K_p = \frac{R_2}{R_1} \Rightarrow R_2 = 0.99819 \cdot 3.3 = 3.3k\Omega$$

$$T_n = C \cdot R_2 \Rightarrow C = \frac{3.39 \times 10^{-4}}{3300} = 0.1\mu F$$

El amplificador operacional escogido es el TL071acp

PI tensión:

Implementamos en PI de tensión a partir de los valores obtenidos en el apartado 2.3.2

$$T_n = 1.167 \times 10^{-3}$$

$$K_p = 46.55$$

El circuito analógico del PI es el que se muestra en la figura 2.37

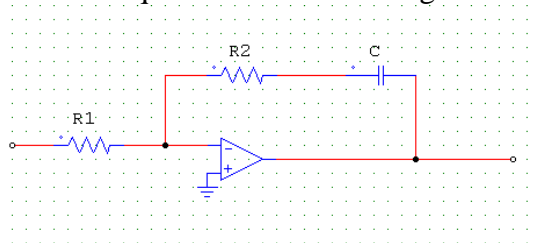


Fig 2.37 PI tensión analógico

Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión

Nos disponemos a calcular los componentes del PI mediante las siguientes formulas:

$$Kp = \frac{R2}{R1} \rightarrow \text{Pues bien establecemos que } R1=250\Omega$$

$$Tn = C \cdot R2$$

$$Kp = \frac{R2}{R1} \Rightarrow R2 = 46.55 \cdot 250 = 11637\Omega$$

$$Tn = C \cdot R2 \Rightarrow C = \frac{1.167 \times 10^{-3}}{11680} = 0.0999\mu F \Rightarrow C = 0.1\mu F$$

Para R1 utilizamos 2 resistencias, 1 de 11k Ω y otra de 680 Ω

El amplificador operacional escogido es el TL071acp

Sumador:

El sumador va a ser el encargado de sumar 2 referencias de nuestro lazo, para realizar el sumador analógico hay que realizar dos pasos, ya que suma pero con valor negativo y este resultado hay que invertirlo:

➤ Sumador:

Tenemos el siguiente circuito analógico:

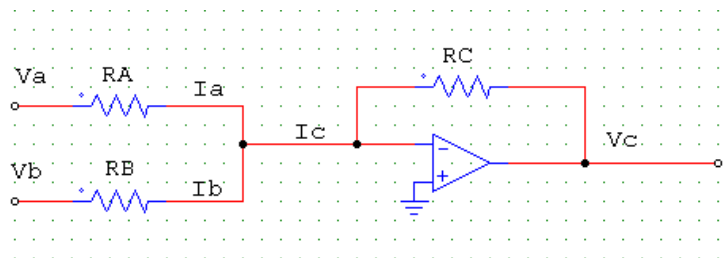


Fig 2.38 Sumador

A partir del circuito de la fig 2.38 podemos obtener las siguientes expresiones por teoría de circuitos:

$$I_a = \frac{V_a}{R_A} \quad I_b = \frac{V_b}{R_B} \quad I_c = \frac{V_a}{R_A} + \frac{V_b}{R_B} \quad V_c = -R_c \left(\frac{V_a}{R_A} + \frac{V_b}{R_B} \right)$$

Si todas las resistencias tienen el mismo valor:

$$V_c = -(V_a + V_b)$$

Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión

➤ Inversor:

La misión de este circuito únicamente es dar valor pasivo a la suma negativa del circuito anterior. Pues bien tenemos el siguiente circuito:

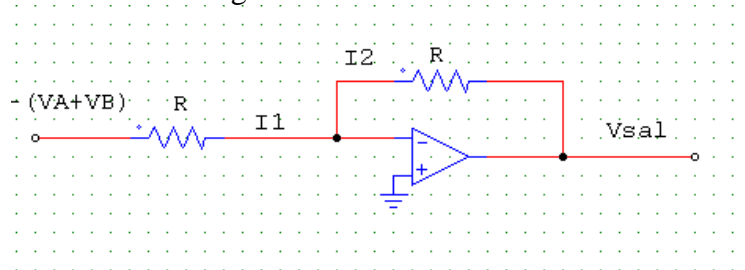


Fig 2.39 Circuito analógico inversor

$$I1 = \frac{-(VA+VB)}{R} \quad I2 = I1 \quad Vsal = -I2 \cdot R = -\frac{-(VA+VB)}{R} \cdot R$$
$$Vsal = VA + VB$$

➤ Conjunto sumador inversor (Sumador analógico)

Si juntamos el sumador con el inversor obtendremos el siguiente circuito, que será el que nosotros vamos a implementar en nuestra placa.

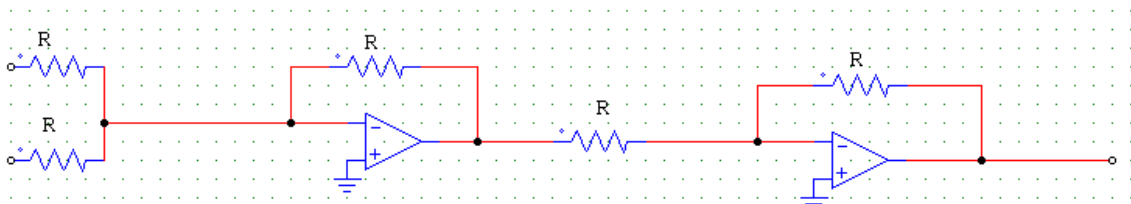


Fig 2.40 Circuito sumador analógico a implementar

Las resistencias serán todas de 10kΩ

Los amplificadores operacionales elegidos son TL071acp

Restador:

El restador va a ser el encargado de restar 2 referencias de nuestro lazo. El circuito analógico a implementar es el siguiente:

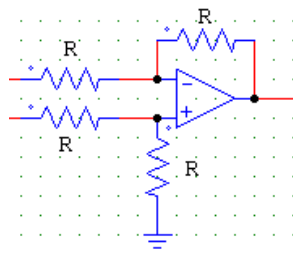


Fig 2.41 Circuito restador analógico

Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión

Las resistencias serán todas de 10kΩ

Los amplificadores operacionales elegidos son TL071acp

Ganancia:

En el lazo de corriente nos encontramos con una ganancia (V_{pt}/V_{dc}) como esta ganancia es menor que la unidad la realizaremos mediante un divisor de tensión, si fuera mayor que la unidad la realizaríamos con un amplificador como el utilizado en el circuito de medida de corriente.

Pues bien nos encontramos con la siguiente situación donde $B=(V_{pt}/V_{dc})A$:

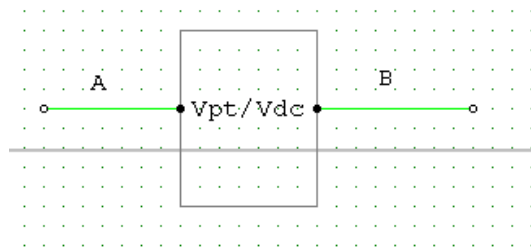


Fig 2.42 Ganancia<1

Mediante la formula de un divisor de tensión obtenemos:

$$V_{final} = V_{inicial} \left(\frac{R2}{R1 + R2} \right) \rightarrow \frac{V_{final}}{V_{inicial}} = \left(\frac{R2}{R1 + R2} \right) \rightarrow \frac{10}{30} = \left(\frac{R2}{R1 + R2} \right)$$

$$10R1 + 10R2 = 30R2$$

$$R1 = 2R2$$

$$R2 = 30k\Omega$$

$$R1 = 15k\Omega$$

Limitador:

El limitador va colocado después de que el lazo de tensión nos de la corriente de referencia para la inductancia, para evitar que se produzcan picos de corriente muy elevados durante el transitorio, o por si se introduce una resistencia que provoca que la corriente en la inductancia sea superior al valor nominal no se estropee el circuito, es una medida de protección. Lo implementaremos mediante un diodo zener.

Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión

Lazo de corriente completo a implementar:

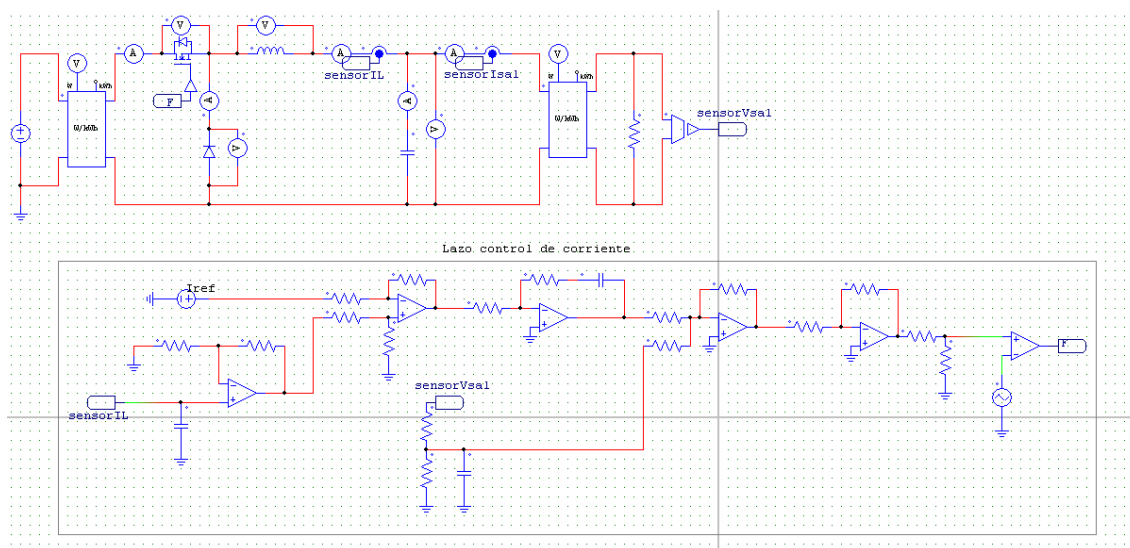


Fig 2.43 Lazo analógico de corriente

Lazo de tensión completo a implementar:

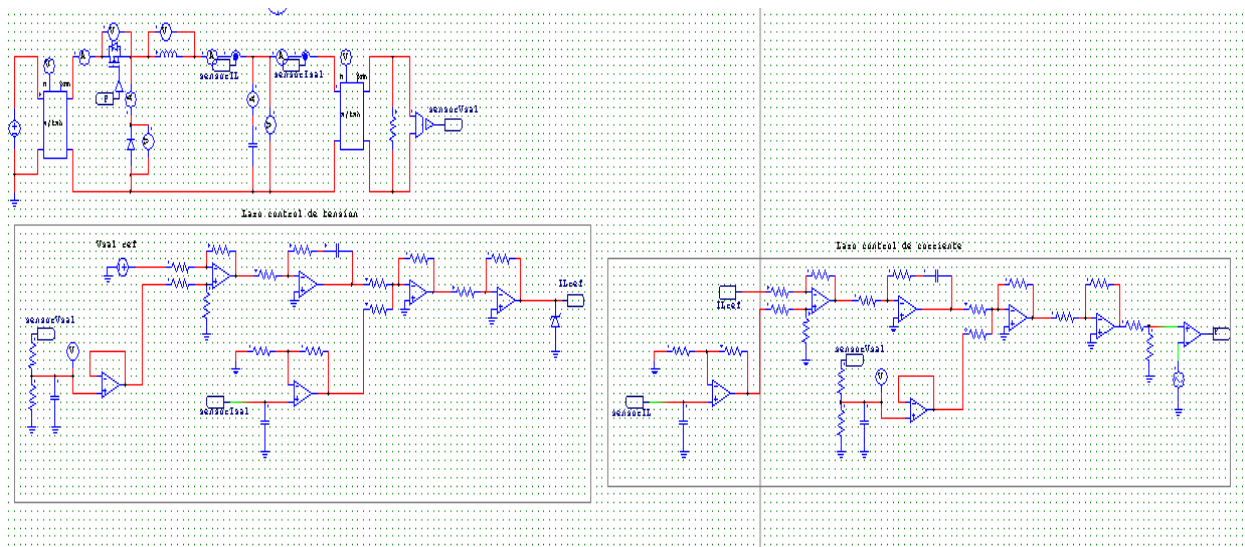


Fig 2.44 Lazo analógico de tensión

Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión

3.FUNCIONAMIENTO DEL CONVERTIDOR

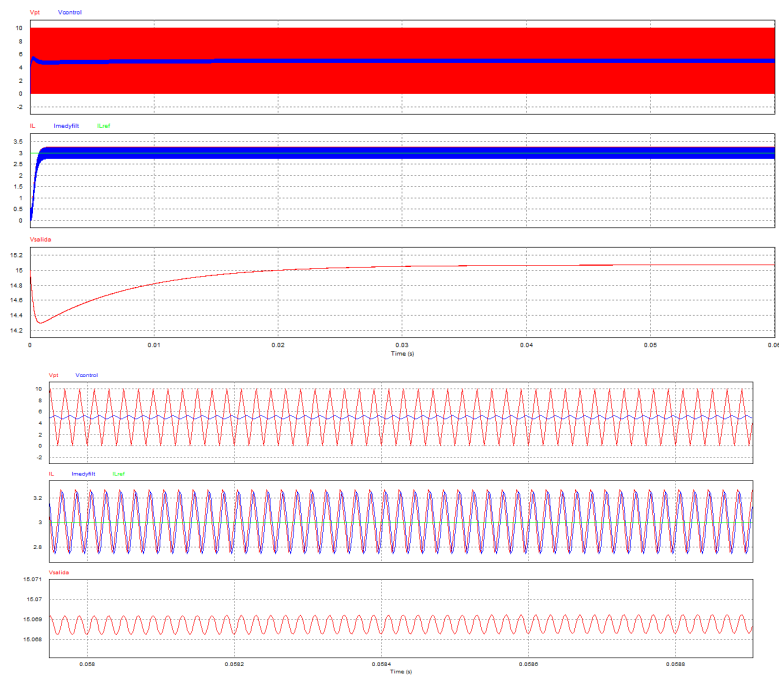
En este apartado vamos a ver como responde el circuito analógico que hemos ido diseñando en el punto anterior, para ello realizaremos diversas simulaciones para ver como se comporta el control. Además de esto realizaremos una comparación entre el circuito con rechazo de perturbaciones y el circuito sin rechazo de perturbaciones.

3.1 SIMULACIONES EN PSIM

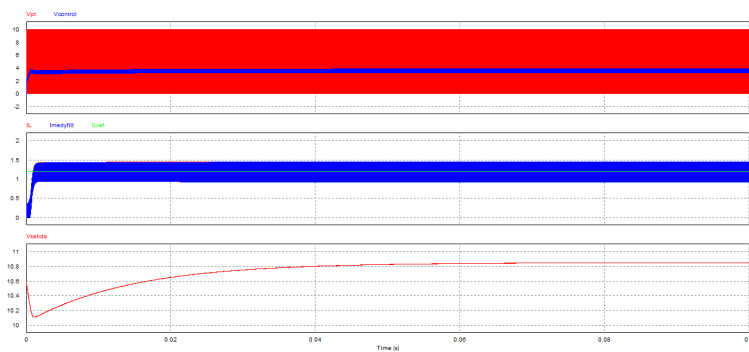
Lazo de corriente:

Veamos como sigue nuestro lazo analógico una referencia de corriente:

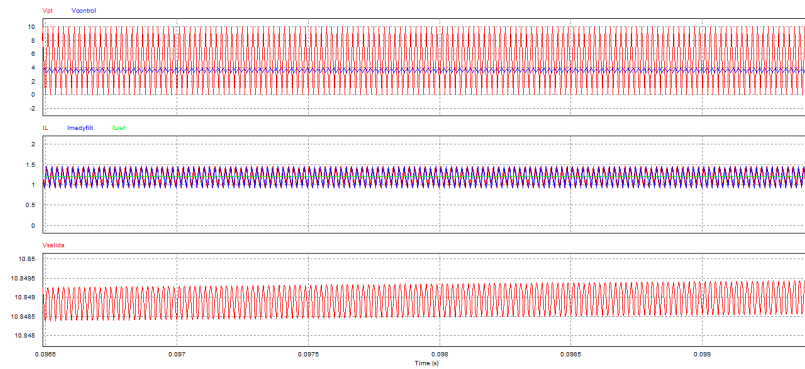
$I_{ref}=3A$



$I_{ref}=1.2A$

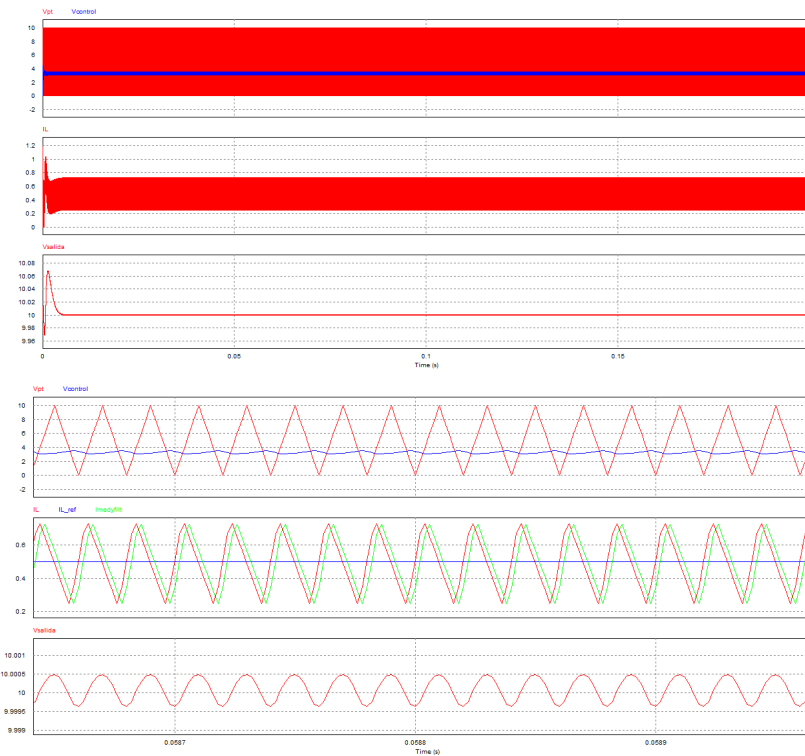


Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión



Lazo de tensión:

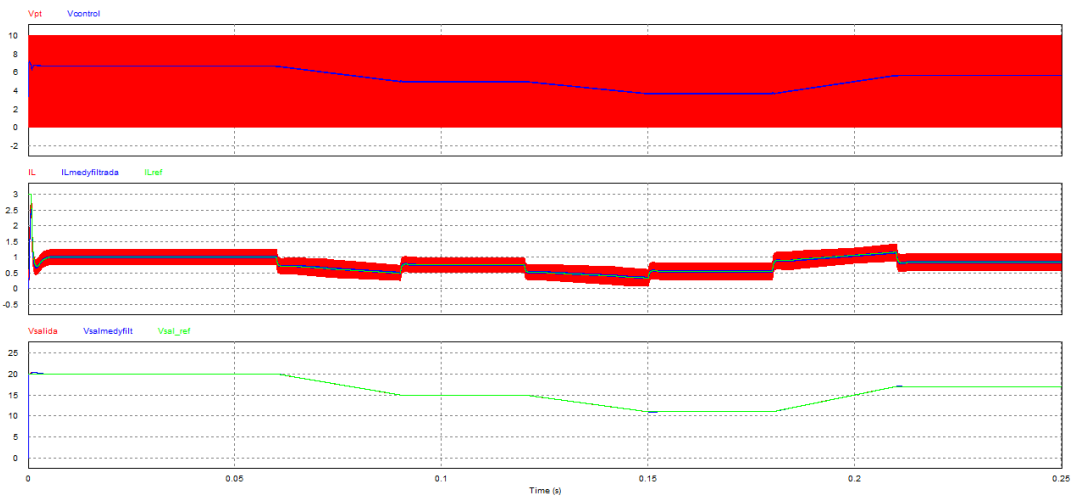
$V=10V$ $R=20\Omega$



Introducimos variaciones en la tensión de referencia:

| | | | | | | | | |
|-----------|----|------|------|------|------|------|------|------|
| Vref (V) | 20 | 20 | 15 | 15 | 11 | 11 | 17 | 17 |
| Tiempo(S) | 0 | 0.06 | 0.09 | 0.12 | 0.15 | 0.18 | 0.21 | 0.25 |

Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión



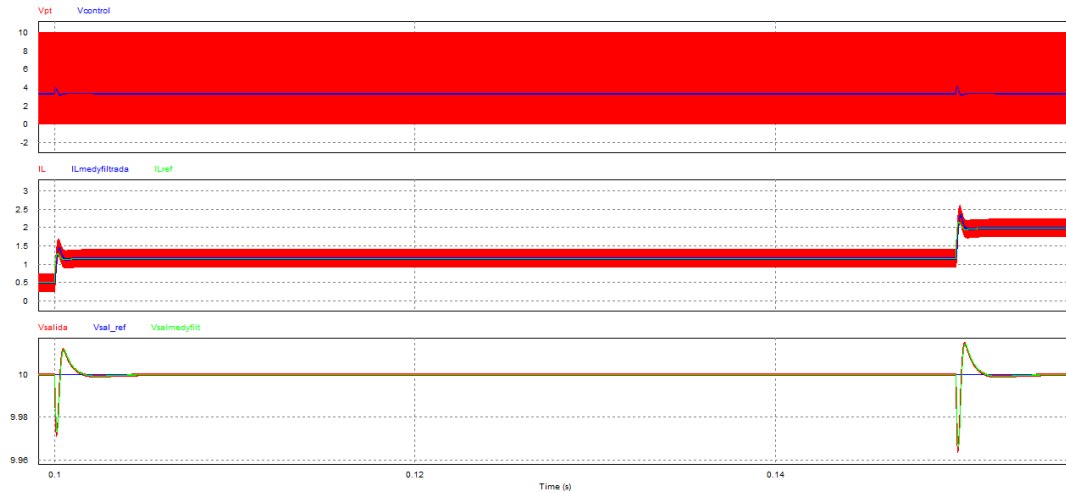
Introducimos variaciones de carga:

Comenzamos el circuito con 10V de referencia y una carga de $20\ \Omega$ y cuando $t=0.1s$ se conecta una carga en paralelo de $15\ \Omega$ y en $t=0.15s$ conectamos otra carga de $12\ \Omega$. Veamos la respuesta del sistema.



Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión

Hacemos un zoom:



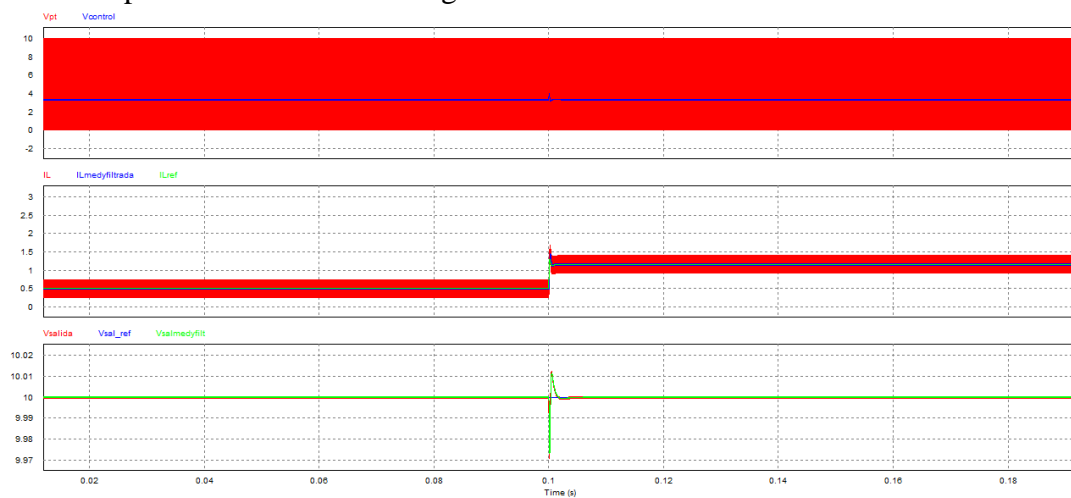
El convertidor prácticamente ni se inmuta de la perturbación.

3.2 COMPARACION ENTRE EL CONVERTIDOR CON RECHAZO DE PERTURBACIONES Y SIN RECHAZO DE PERTURBACIONES

La primera grafica de cada tanda corresponde al circuito con rechazo de perturbaciones y la segunda grafica corresponde al circuito sin rechazo de perturbaciones:

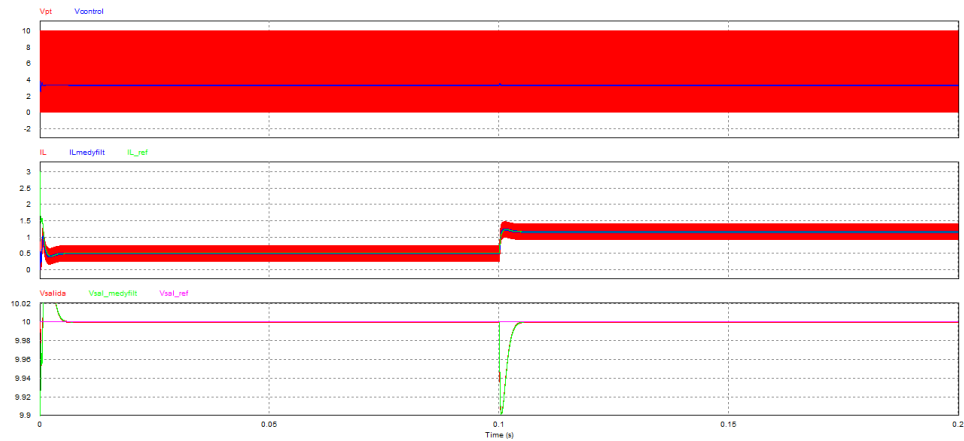
Comenzamos el circuito con 10V de referencia y una carga de $20\ \Omega$ y cuando $t=0.1s$ se conecta una carga en paralelo de $15\ \Omega$ y en $t=0.15s$ conectamos otra carga de $12\ \Omega$ Veamos la respuesta del sistema.

Rechazo de perturbación con una carga:

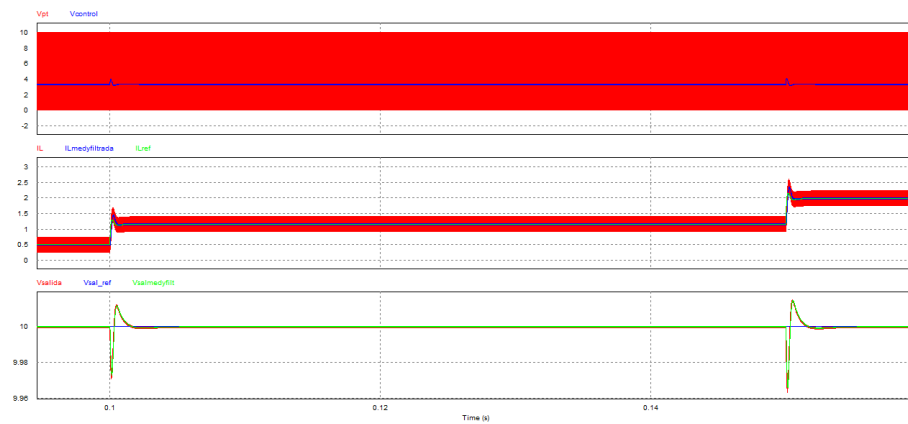


Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión

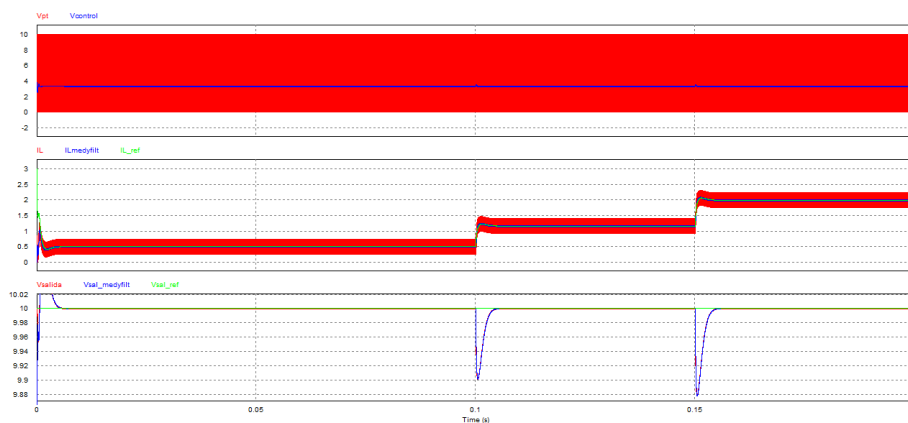
Sin rechazo de perturbación con una carga:



Rechazo de perturbación con 2 cargas:



Sin rechazo de perturbación con dos cargas:



Se observa que en el circuito que se rechazan las perturbaciones, cuando entra alguna es as rápido en estabilizarla y la perturbación es menor.

Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión

4. MATERIALES

Los materiales necesarios para construir este convertidor son los siguientes:

| | | | | | | |
|--------------------------|-----------------|---------------------------|-----------------------|-----------------|---------------|--------------|
| Placa | | | | | | |
| | Elemento | Parte del elemento | Codigo Farnell | Unidades | Precio | Total |
| | Inductancia | Nucleo | 2103379 | 1 | 3,54 | 3,54 |
| | Inductancia | Carrete | 178920 | 1 | 2,25 | 2,25 |
| | condensador | 1500uF electrolítico | 1903223 | 1 | 2,34 | 2,34 |
| | Diodo | Mbr1060 | 1611585 | 1 | 0,79 | 0,79 |
| | Mosfet | n 60v, 10A, TO 220 | 8651370 | 1 | 0,93 | 0,93 |
| Restadores | | | | | | |
| | Elemento | Parte del elemento | Codigo Farnell | Unidades | Precio | Total |
| | ResistenciaS | 10K 1% 0.5W | 1416927 | 8 | 0,053 | 0,424 |
| | Operacional | TL071acp | 1459696 | 2 | 0,64 | 1,28 |
| Sumadores | | | | | | |
| | Elemento | Parte del elemento | Codigo Farnell | Unidades | Precio | Total |
| | Resistencia | 10K 1% 0.5W | 1416927 | 10 | 0,053 | 0,53 |
| | Operacional | TL071acp | 1459696 | 4 | 0,64 | 2,56 |
| Ganancia | | | | | | |
| | Elemento | Parte del elemento | Codigo Farnell | Unidades | Precio | Total |
| | Resistencia | Rg1 30k 0,5w 5% | 9340378 | 1 | 0,036 | 0,036 |
| | Resistencia | Rg2 15k 0,5w 5% | 9340009 | 1 | 0,03 | 0,03 |
| | zener | diodo zener | 1612373 | 1 | 0,087 | 0,087 |
| Sensor tension | | | | | | |
| | Elemento | Parte del elemento | Codigo Farnell | Unidades | Precio | Total |
| | Resistencia | Rg1 30k 0,5w 5% | 9340378 | 1 | 0,036 | 0,036 |
| | Resistencia | Rg2 15k 0,5w 5% | 9340009 | 1 | 0,03 | 0,03 |
| | Condensador | Cfv 2,7nF Ceramico | 1694127 | 1 | 0,026 | 0,026 |
| | Operacional | TL071acp | 1459696 | 1 | 0,64 | 0,64 |
| Filtros Corriente | | | | | | |
| | Elemento | Parte del elemento | Codigo Farnell | Unidades | Precio | Total |
| | Lem | Lem corriente | 1617404 | 2 | 17,68 | 35,36 |
| | Resistencia | R1 10k 0,5w 1% | 1416927 | 2 | 0,053 | 0,106 |
| | Resistencia | R2 11K 0,5w 1% | 1099891 | 2 | 0,114 | 0,228 |
| | Resistencia | Rf 316 0,6w 1% | 9467246 | 2 | 0,044 | 0,088 |
| | Condensador | Cf 0,1uF ceramico | 1141784 | 2 | 0,31 | 0,62 |
| | Operacional | TL071acp | 1459696 | 2 | 0,64 | 1,28 |
| PI corriente | | | | | | |
| | Elemento | Parte del elemento | Codigo Farnell | Unidades | Precio | Total |
| | Resistencia | Rpi1 3k3 1% 0,5w | 9338713 | 1 | 0,017 | 0,017 |
| | Resistencia | Rpi2 3k3 1% 0,5w | 9338713 | 1 | 0,017 | 0,017 |
| | Condensador | Cpi 0,1uF ceramico | 1141784 | 1 | 0,31 | 0,31 |
| | operacional | TL071acp | 1459696 | 1 | 0,64 | 0,64 |
| PI Tension | | | | | | |
| | Elemento | Parte del elemento | Codigo Farnell | Unidades | Precio | Total |
| | Resistencia | Rpi1 250 1% 0,5w | 1853420 | 1 | 0,33 | 0,33 |
| | Resistencia | Rpi2 680 1% 0,5w | 1265116 | 1 | 0,14 | 0,14 |
| | Resistencia | Rpi2 11k 1% 0,5w | 1099989 | 1 | 0,114 | 0,114 |
| | Condensador | Cpi ceramico 0,1uf | 1141784 | 1 | 0,31 | 0,31 |
| | operacional | TL071acp | 1459696 | 1 | 0,64 | 0,64 |

El precio total de los materiales para realizar el convertidor es de 58.126€.

Convertidor Reductor (Buck) con control de corriente y de tensión

5.PROGRAMA PSIM

Los programas realizados en Psim son los siguientes:

- Control sin rechazo de perturbaciones mediante lazos
- Control con rechazo de perturbaciones mediante lazos
- Control con rechazo de perturbaciones analógico

Todos ellos tienen dos ficheros, uno con el lazo de corriente y el otro con el lazo de tensión y corriente en cascada.

En los circuitos de tensión realizados en Psim el valor de referencia a introducir es el valor real de referencia de la variable a controlar, el circuito está programado para que convierta esa referencia a nuestros valores escalados. Es decir que si yo quiero introducir una tensión de referencia de 15V tengo que poner en la fuente de tensión los 15V y no los 5V que debería poner escalados. Esto está hecho así para no liarnos al meter los valores de referencia ni tener que hacer reglas de tres para ver que tensión escalada corresponde a la de referencia.

6.BIBLIOGRAFIA

El material consultado para realizar este trabajo fin de master es el siguiente:

-Apuntes de segundo curso de ITI ELECTRICIDAD de electrónica de potencia de Luis Marroyo

-Apuntes del MASTER EN ENERGÍAS RENOVABLES de electrónica de potencia de Eugenio Gubia

-Apuntes de Fotovoltaica del MASTER EN ENERGÍAS RENOVABLES de Roberto González

-Tesis de Luis Marroyo

-Libro de electrónica de Allan R. Hambley.